

WECHSELWIRKUNGEN
VON GLOBALEN UND LOKALEN
BEWEGUNGSREIZEN
IM VISUELLEN SYSTEM DES MENSCHEN

KLAUS GERBER

Disbui. München

1988



WECHSELWIRKUNGEN VON GLOBALEN UND LOKALEN
BEWEGUNGSREIZEN IM VISUELLEN SYSTEM DES MENSCHEN

DISSERTATION

der Fakultät für Physik
der Ludwig-Maximilians-Universität
München

vorgelegt von

KLAUS GERBER

aus Oberstdorf

München, den 8. Oktober 1987

1. Gutachter: Prof. Dr. R. Röhler

2. Gutachter: Prof. Dr. H.-G. Groth

Tag der mündlichen Prüfung: 2. März 1988



drucken + binden
gmbh
Schellingstraße 23
8000 München 40
☎ 089/28 44 45

INHALTSVERZEICHNIS

Zusammenfassung	5
1. Einleitung	7
2. Bewegungswahrnehmung als eigenständiger Sinneseindruck	13
2.1 Modelle zur Bewegungswahrnehmung	14
2.2 Neuronale Hardware für die Bewegungswahrnehmung	17
3. Experimenteller Aufbau	19
3.1 Laborausstattung	20
3.2 Mathematische Beschreibung der Muster	21
3.3 Hardware-System	23
3.4 Software-System	27
4. Meßmethoden	34
4.1 Verschiebungsschwellenmessung	34
4.2 Reaktionszeitmessung	35
4.3 Kontrastschwellenmessung	37
5. Experimente	40
5.1 Versuchspersonen	40
5.2 Verschiebungsschwellenmessung	42
5.3 Versuchsablauf, Versuchsdurchführung	44
5.3.1 Vorversuche, Ergebnisse, Diskussion	45
5.3.2 Kontroll- und Nullmessungen	49
5.3.2.1 Ergebnisse	49
5.3.2.2 Blinkmessung	51
5.3.2.3 Diskussion	53
5.3.3 Induktionsmessung	54
5.3.4 Vergleich von Verschiebungsschwellen	64
5.3.4.1 Mit und ohne Induzierung	64
5.3.4.2 Aufblinken und Induktionsbewegung	67
5.3.5 Auswertemethoden	69
5.3.6 Diskussion der Ergebnisse aus den Verschiebungsschwellenexperimenten	74
5.3.6.1 Einfluß der retinalen Inhomogenität	75
5.3.6.2 Geschwindigkeitsabhängigkeit	80
5.3.6.3 Richtungs- und Abstandsabhängigkeit	80
5.3.7 Zusammenfassung und Folgerungen für weitere Experimente	85
5.4 Reaktionszeitmessung	87

5.4.1 Messung mit zwei Objekten	88
5.4.1.1 Versuchsdurchführung und Versuchsablauf	88
5.4.1.2 Richtungsabhängigkeit	91
5.4.1.3 Reaktionszeithistogramme	98
5.4.1.4 Startzeitpunkte der Testbewegung	101
5.4.1.5 Diskussion der Ergebnisse des Experiments mit zwei Objekten	108
5.4.2 Messung mit Balkenobjekt	114
5.4.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsablauf	114
5.4.2.2 Auswertemethode	118
5.4.2.3 Ort- Zeitdarstellung	120
5.4.2.4 Diskussion der Ergebnisse des Experiments mit Balkenobjekt	137
6. Diskussion	146
6.1 Reaktionszeitmessungen	146
6.2 Balkenexperiment mit Kontrastschwellenmessung	147
6.3 Rolle der Augenbewegungen	151
6.4 Gaborfunktionsmessung	154
6.5 Interpretation der Ergebnisse	157
7. Anhang A	
Literaturverzeichnis	163
8. Anhang B	
FMG-Programmierbeispiele	177

ZUSAMMENFASSUNG

Ausgehend von Experimenten zur lokalen Ortsfrequenzanalyse, die nur einen streng lokalen Adaptationseffekt nachweisen, werden Untersuchungen zu lokalen und globalen Verarbeitungsarten im visuellen System des Menschen durchgeführt. Die vorliegende Arbeit berichtet über psychophysikalische Experimente zur Analyse des lokalen und globalen Charakters der visuellen Bewegungswahrnehmung. Erstmals bestehen hier die Reizkonfigurationen unter anderem aus mehreren, lokalisierten Objekten, die ebenfalls nur lokalisierte Bewegungsreize auslösen können. Es interessieren besonders die Wechselwirkungen zwischen im Gesichtsfeld getrennten, lokalisierten Bewegungsinformationen. Zusätzlich zeigen einige Experimente noch Beziehungen zwischen globalen und lokalen Bewegungen auf, sowie die rezeptiven Feldprofile, die zur Verarbeitung der Bewegungsreize herangezogen werden können. Die Experimente in dieser Arbeit waren bislang mit vertretbarem Aufwand nicht zu realisieren und werden in der Literatur auch nicht behandelt - trotz der Möglichkeit, aufschlußreiche Ergebnisse zum Wechselspiel zwischen lokaler und globaler Verarbeitung visueller Informationen zu erhalten.

Mit der Entwicklung eines universellen, computergesteuerten Meßaufbaus gelingt es zum ersten Mal, mehrere von einander unabhängige, bewegte Objekte und Strukturen in einer geschlossenen Versuchsanordnung zu erzeugen und zu manipulieren. Damit ist eine bislang nur selten mögliche Vergleichbarkeit von unterschiedlichen Reizkonfigurationen gegeben. Eine einfache Programmierung dieses elektronischen Farbmustergenerators ermöglicht es, ihn für fast alle denkbaren psychophysikalischen Experimente einzusetzen. Der Aufbau erlaubt sowohl, zuvor gespeicherte Bewegungsabläufe und Bildmanipulationen abzurufen als auch, zur schnellen Reaktion auf eine Antwort der Versuchsperson, eine Beeinflussung der Bilder in Echtzeit.

Die Bewegungsschwellen werden mit drei verschiedenen Meßmethoden erfaßt: Verschiebungsschwellen, Reaktionszeiten und Kontrastschwellen. Es zeigt sich, daß Kontrastschwellenmessungen auf Grund ihrer schwierigen Fehlerbestimmungen nur qualitative Aussagen zulassen und keine ausreichende Reproduzierbarkeit aufweisen. Die zuverlässigsten Resultate liefern Reaktionszeitmessungen. Bei entsprechend großer Anzahl Einzelmessungen können, in Verbindung mit einem zeitlichen Antwortfenster und der Berücksichtigung der "Tagesform" der Versuchsperson, die Fehler des Mittelwertes klein gehalten werden. Zur Auswertung der Verschiebungsschwellenmessung wird ein Summationsverfahren vorgestellt, das Ergebnisse liefert, die dann eine zu den Reaktionszeitmessungen vergleichbare Qualität besitzen.

In den Experimenten antworten die Versuchspersonen auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts, unabhängig vom Bewegungszustand eines weiteren Objekts im Gesichtsfeld. Das zweite Objekt wird als die Bewegung induzierendes Objekt bezeichnet. Die Auswahl der relevanten experimentellen Parameter erfolgt durch mehrere Null- und Kontrollmessungen mit und ohne Bewegung des Induktionsobjekts. Die Ergebnisse werden in Abhängigkeit der Bewegungszustände des Induktions- und Testobjekts, ihrem örtlichen retinalen Abstand, ihrem zeitlichen Abstand bezüglich der einsetzenden Bewegungen und ihrer Bewegungsrichtungen sowie ihrer Bewegungsgeschwindigkeiten und der retinalen Exzentrizität diskutiert.

Es zeigt sich, daß nur bei der Existenz einer induzierenden Bewegung ein Informationstransfer zum Testobjekt stattfindet und die Empfindlichkeit für die Testbewegung unter günstigsten Versuchsbedingungen um bis zu 30% anwächst. Der Effekt hängt stark von der induzierenden Objektgeschwindigkeit ab. Seine Reichweite beträgt bis zum 15-fachen der induzierenden Bewegungsstrecke. Die Richtung der Induktion spielt nur eine untergeordnete Rolle. Die Richtungsabhängigkeit der Testbewegung existiert nur bei Versuchen ohne Induktion und läßt sich mit der retinalen Inhomogenität erklären.

Experimente mit einem durch das Gesichtsfeld bewegten Balken zeigen, daß neben der Objektgeschwindigkeit auch der Zeitpunkt des Tests eine wichtige Rolle spielt. Nachdem sich der Balken durch das Induktionsgebiet bewegt hat, verdeckt eine Maske seine weitere Bewegung. Ein Verschieben der Zeitpunkte des am Ende der Maske wieder sichtbaren Balkens läßt die Empfindlichkeit für die Bewegungswahrnehmung um bis zu 25% ansteigen oder abfallen. Der Ort der Bewegung beeinflusst dabei die Stärke des Induktionseffekts nur unwesentlich.

Als Analysemechanismen werden rezeptive Felder mit elliptischen Gaborfunktion im x - y - t Raum der Bewegungswahrnehmung diskutiert. In einem Adaptationsexperiment gelingt es, über die Qualität der Unschärferelation, die diese Funktionenschar erfüllt, die Relevanz der Ergebnisse aus neurophysiologischen kortikalen Zellableitungen in einem psychophysikalischen Experiment für die visuelle Wahrnehmung zu bestätigen und ihre Anwendung auf die Bewegungswahrnehmung zu rechtfertigen.

Die Wechselwirkungen zwischen lokalen Bewegungselementen lassen sich nur bei der Existenz einer hierarchischen Struktur verstehen. Über einen Diffusionsprozeß werden die Ergebnisse modelliert. Dabei zeigt sich, daß die Empfindlichkeitserhöhung durch die induzierende Bewegung nur innerhalb einer Verarbeitungsebene der Diffusionsgleichung genügt. Zwischen den Ebenen findet ein Informationstransfer statt, der für eine schnelle, örtliche und zeitliche Ausbreitung der lokalen Bewegungsinformation sorgt.

1. Einleitung

Im Zuge einer immer stärker fortschreitenden Automatisierung in der Arbeitswelt steigt das Verlangen nach effektiveren Methoden zur Verarbeitung optischer Signale. Der Wunsch nach immer "intelligenteren" bilderkennenden und -verarbeitenden Systemen treibt die Entwicklung von digitalen, computerangepaßten Lösungen voran. Da das menschliche visuelle System das bei weitem leistungsfähigste bekannte Bildverarbeitungssystem darstellt, erscheint es sinnvoll zu versuchen, die beim visuellen System realisierten Mechanismen auch bei der technischen Bildverarbeitung zu benutzen. So werden vielfach, zum Beispiel bei der Ecken- und Kantenerkennung, digitale Filteralgorithmen implementiert, die in ihrer Struktur den rezeptiven Feldern des menschlichen visuellen Systems entsprechen (MARR, 1980; HILDRETH, 1983; TORRE, 1986). Die rezeptiven Felder existieren in einer von einfachen zu komplizierten physiologischen Funktionen aufsteigenden Hierarchie. In ihrer einfachsten Version können sie auch durch sogenannte lokale Ortsfrequenzkanäle beschrieben werden (CAMPBELL, 1968; SACHS, 1971; SAGI, 1985).

Auch auf dem Gebiet der digitalen Bildcodierung zur Übertragung datenreduzierter Fernsehsignale fließen Erkenntnisse über Eigenschaften des menschlichen visuellen Systems in die implementierten Codierverfahren ein (BURT, 1983; TENGLER, 1984). So werden unter anderem die Kontrastempfindlichkeit, die Modulationsübertragungsfunktion, die Gradations-, Detail- und Bewegungsauflösung und die Maskierungseffekte berücksichtigt. WATSON (1986) bestimmt ein "Fenster der Sichtbarkeit" im Orts- und Zeitfrequenzraum aus dem er Bedingungen für die Wiedergabe von Fernsehbildern ableitet.

Neben der digitalen Mustererkennung an statischen Bildern gewinnt auch die Analyse von Bewegtbildsequenzen und bewegten Objekten immer mehr an Bedeutung (LIMB, 1975; FENNEMA, 1978; BRUSS, 1982; DAVIS, 1982; LAWTON, 1982). In der Bildcodierung ist es zum Erreichen niedrigster Bildübertragungsraten bei gleichbleibender Bildqualität unerlässlich, in Bildsequenzen bewegte Objekte zu erkennen und für die Signalübertragung zu markieren. Die zur Codierung und Decodierung verwendeten Algorithmen sollten aber mehr als nur die Eigenschaften der Bewegungswahrnehmung beim visuellen System des Menschen berücksichtigen. Mit einem besseren Verständnis der zugrunde liegenden Verarbeitungshierarchien können zusätzlich wertvolle Hinweise auf Bewegungsanalyseprinzipien gegeben werden, die weit über die Möglichkeiten der üblicherweise eingesetzten Computeralgorithmen hinausreichen.

Psychophysikalische Experimente zur visuellen Bewegungswahrnehmung beim Menschen erlauben Rückschlüsse auf die von der Natur entwickelten Mechanismen sowie ihre Verknüpfungen zur Analyse der Umwelt. Natürlich ist die

Bewegungswahrnehmung nur eine von vielen visuellen Sinneseindrücken. Ihre Ausnahmestellung zeigt sich aber in der Tatsache, daß sie als erste visuelle Wahrnehmungsform von der Evolution hervorgebracht wurde. Farbensehen ist nicht allen Tieren gegeben, ebenso können nur Tiere mit sich überdeckenden Gesichtsfeldern einen stereoskopischen Bildeindruck erfahren. Im Gegensatz dazu besitzen alle Tiere die Fähigkeit zur Wahrnehmung von Bewegungen. Die Erkennung stationärer Objekte ist sogar nur höheren Säugetieren vorbehalten.

Das visuelle System ist zu dem das einzige Wahrnehmungssystem des Menschen, mit dem eine Objektgeschwindigkeit registriert werden kann.

Zur effektiven Verarbeitung der örtlichen und zeitlichen Informationen der Umwelt benötigt das visuelle System Mechanismen, mit denen es in der Lage ist, Bildstrukturen zu extrahieren und optimal darzustellen. In der Literatur zeichneten sich lange zwei grundlegend verschiedene Beschreibungs- und Verarbeitungsarten ab. So werden örtlich lokalisierte Merkmalsdetektoren (z.B.: HUBEL, 1974; MARR, 1980) einer globalen Bildanalyse in Form von Detektoren im Fourierraum gegenübergestellt (z.B.: CAMPBELL, 1968; MAFFEI, 1973; KELLY, 1975; POLLEN, 1982). DAUGMAN (1985) vergleicht die gegenläufigen Auffassungen mit der Diskussion des Welle-Teilchen-Dualismus der Quantenphysik. Als einer der Ersten interpretiert MARCELJA (1980) mit Hilfe von Gaborfunktionen (GABOR, 1946) die rezeptiven Feldprofile von kortikalen Simple-Zellen und kann mit der für diese Funktionenschar geltende Unschärferelation zwischen Ort- und Ortsfrequenzbandbreite die Verbindung von lokaler und globaler visueller Bildanalyse herstellen (siehe auch DAUGMAN, 1980). Damit wird also die globale und die lokale Analyse zu einer lokalen Ortsfrequenzanalyse kombiniert. Ortsfrequenzkanäle im visuelle System sind seit langem bekannt und mit zahlreichen Adaptationsexperimenten die dazugehörigen Bandbreiten bestimmt worden (CAMPBELL, 1968; MAFFEI, 1973; KLEIN, 1974; REGAN, 1983). VEY (1984) untersucht in seinen Experimenten die örtliche Ausbreitung des Adaptationseffekts mit Gabormustern (siehe auch RÖHLER, 1985). In Bild 1.1 a) ist der schematische Aufbau eines dieser Experimente wiedergegeben. Die Zahlen 1 bis 7 bezeichnen die einzelnen Testmusterpositionen. Ihre Halbwertsbreite (HWB) beträgt 0.15° Sehwinkel. Die Ausdehnung der Adaptationsgaborfunktion beträgt das 2.826-fache der HWB und ist mit dem gestrichelten Kreisbogen in Bild 1.1 a) angedeutet. Die Testpositionen 1 und 2 liegen also vollständig im adaptierten Bereich, während Position 3 nur zum Teil überdeckt wird. Die Versuchspersonen (HD, OF) flixieren während der Adaptations- und Testphase den Punkt links von Testposition 1. Die Resultate sind in Teilbild 1.1 b) in Form der relativen Kontrastschwellenerhöhung von mit und ohne Adaptation gewonnenen Werten bezüglich der Exzentrizität der Testmuster 1 bis 7 für Adaptations- und Testmusterfrequenzen 3.33 cpd, 6.66 cpd und 13.66 cpd aufgetragen. Es zeigt sich, daß der Adaptationseffekt streng lokal ist. In allen Kurven geht die relative Schwellenerhöhung bei spätestens Testmuster 4 auf null zurück. (Die Erhöhungen bei Muster 5 bis 7 bei 3.33 cpd lassen sich auf experimentelle Darbietungsbedingungen zurückführen.)

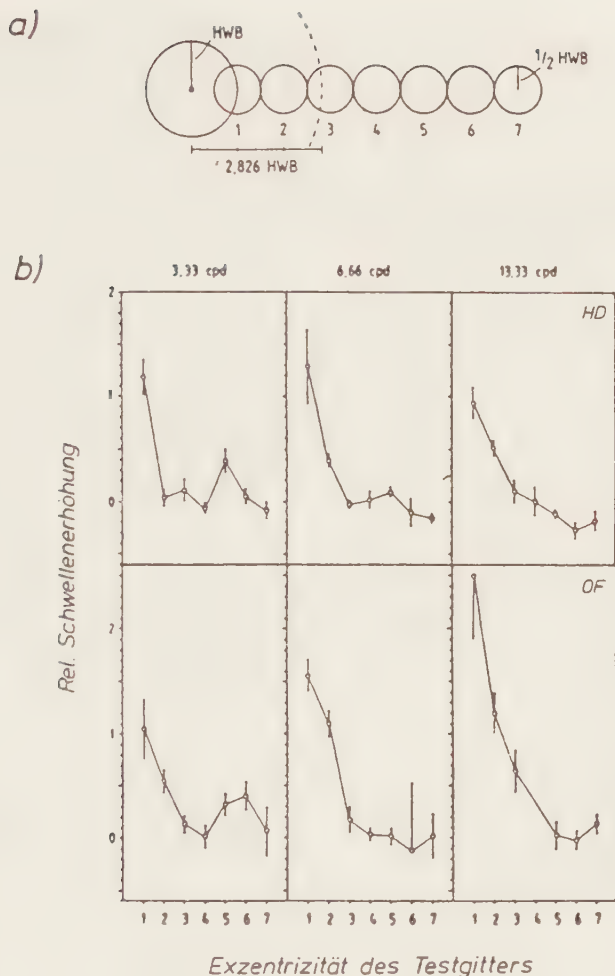


Bild 1.1: Experiment zur lokalen Ortsfrequenzanalyse mit Gaborfunktionen nach VEY (1984) (siehe auch RÖHLER, 1985). HWB (= Halbwertsbreite des Gaußfunktionanteils der Gaborfunktion): 0.15° Sehwinkel. 1..7: Testmusterpositionen ($0.15^\circ..1.05^\circ$). Größe des Adaptationsmusters: 2.826-fache der HWB (gestrichelter Kreisbogen). Aufgetragen ist die relative Kontrastschwellenerhöhung über der Exzentrizität des Testgitters. Versuchspersonen HD und OF.

a) Schematischer Aufbau der Reizmuster

b) relative Kontrastschwellenerhöhung bei Adaptation auf die Ortsfrequenzen 3.33, 6.66 und 13.66 cpd.

Zur Vermeidung einer hier störenden Lokaladaptation bewegten sich in den Experimenten von VEY die Sinusanteile der Gaborfunktionen mit $0.65^\circ/\text{s}$ und einer Umkehrfrequenz von 0.39 Hz. VEY bemerkt, daß bei höheren Driftgeschwindigkeiten der Sinusgitter ($> 1^\circ/\text{s}$) die strenge Lokalität des Adaptationseffekts verloren geht. Der Adaptationseffekt tritt zurück, und Mechanismen einer globaleren Bewegungsverarbeitung übernehmen die Analyse der Muster. Dies ist ein erster Hinweis auf den globaleren Charakter der Bewegungswahrnehmung. VEY (1984) schreibt jedoch diesen Effekt zum großen Teil induzierten Augenbewegungen zu.

Mit zahlreichen Experimenten werden in dieser Arbeit Wechselwirkungen lokaler Bewegungsreize extrahiert, beschrieben und Modellvorstellungen abgeleitet. Dabei dienen nicht oszillierende Sinusgitter mit einer gaußförmigen Einhüllenden, sondern einzelne, nur lokal bewegte Objekte als Reizauslöser und als Testreiz. Die Betonung liegt hier auf der Lokalität der Reizanordnungen. Erstmals ist es durch die Entwicklung eines universell verwendbaren elektronischen Meßaufbaus möglich, psychophysikalische Experimente zur Bewegungswahrnehmung durchzuführen, die mehrere, von einander unabhängige, bewegte Objekte und Strukturen in einer geschlossenen Versuchsanordnung enthalten. Damit entsteht eine bislang nur selten mögliche Vergleichbarkeit von Experimenten und Resultaten mit sehr unterschiedlichen Reizkonfigurationen. Der computergesteuerte Versuchsaufbau läßt sich durch einfache Programmierung für fast alle denkbaren psychophysikalischen Experimente einsetzen. (Alle psychophysikalischen Experimente am Institut für med. Optik, Abt. Datenverarbeitung, der Ludwig-Maximilians-Universität München benutzen diesen Aufbau.)

Wechselwirkungen zwischen lokaler und globaler Analyse des visuellen Systems beschreiben DAWSON (1986), BURR (1986) und GERRISSEN (1982, 1984). DAWSON erhält in seinen Experimenten Hinweise auf beide Verarbeitungsrichtungen: global - lokal und lokal - global. BURR schließt aus seinen Experimenten mit Schachbrettmustern, daß das visuelle System eine lokale Analyse nur durchführt, falls im Muster die 5. Harmonische sichtbar ist, sonst erfolgt eine globale Verarbeitung. BURR kann für dieses Verhalten keine Erklärung bieten. Seine Experimente zeigen jedoch, daß ausgeprägte Beziehungen zwischen beiden Verarbeitungsarten existieren müssen. Eine von global zu lokal wechselnde Analyse favorisiert GERRISSEN in seinem Modell. Der globalen Struktursegmentierung und Merkmalsklassifikation folgt eine detaillierte Extraktion der lokalen Informationen. GERRISSEN beweist dies anhand von Augenbewegungen bei der Abtastung eines Objekts.

Globale und lokale Merkmale stehen sich auch bei der Analyse des durch Augen-, Eigen- und Objektbewegungen entstehenden zweidimensionalen retinalen Geschwindigkeitvektorfeldes der Außenwelt gegenüber (HORN, 1980; LEE, 1980; KOENDERINK, 1986). In diesem Feld des sogenannten optischen Flußes sind Informationen über relative Entfernungen, Größen und Orientierungen von

Oberflächen und Objekten enthalten (LEE, 1981). Globale Merkmale sind Rotationen und Translationen. Lokale Merkmale lassen sich aus dem mittleren Geschwindigkeitsvektor des Flusses innerhalb eines begrenzten Bereichs und aus der Geschwindigkeitsvariation in unmittelbarer Nachbarschaft dieser Lokalität extrahieren (KOENDERINK, 1986).

Seit BRADDICK (1974) wird die Bewegungserkennung in zwei getrennte Prozesse unterteilt: Einen kurzreichweitigen ("short-range") Prozeß (maximal 0.25° Sehwinkel), der lokale Elemente von gleicher Helligkeitspolarität in kleinen örtlichen und zeitlichen Intervallen bearbeitet, und einen langreichweitigen ("long-range"), der ganze Objekte unabhängig ihrer Struktur, Helligkeitspolarität, Farbe und Textur über große Interstimulus-Intervalle hinweg verarbeitet (siehe auch ANSTIS, 1980; BAKER, 1985; KRUSE, 1986). Über Wechselwirkungen zwischen beiden Prozessen existieren in der Literatur keine genauen Angaben. MATHER (1985) demonstriert mit seinem experimentellen Aufbau, daß ein Rivalisieren der Prozesse vorhanden ist. Dies schreibt er nicht einer einfachen inhibitorischen Wechselwirkung zu, sondern vermutet einen höheren Entscheidungsprozeß in der Bewegungserkennung (siehe auch BRADDICK, 1980).

Die meisten Untersuchungen zur Bewegungserkennung benutzen bewegte Gitter oder Zufallspunktmuster (z.B.: BURR, 1982; VAN DOORN, 1985). Wechselwirkungen zwischen lokalen sowie zwischen lokalen und globalen Bewegungsreizen sind damit nicht zu extrahieren.

Die Frage nach Beziehungen zwischen isolierten lokalen Bewegungsreizen wird deshalb in dieser Arbeit mit ebenfalls lokalisierten Objekten und lokalisierten Objektbewegungen untersucht. Dabei wird in Analogie zum Experiment mit lokaler Ortsfrequenzadaptation ein lokaler, induzierender Bewegungsreiz gegeben, und Schwellenmessungen an einem örtlich und zeitlich entfernten zweiten Objekt vorgenommen. Ein bewegtes, globales Hintergrundgitter zeigt dann Wechselwirkungen mit den Objekten, und man kann, im Falle eines Informationstransfers zwischen den einzelnen Bewegungsreizen, auf höhere Verarbeitungsstufen in der Bewegungswahrnehmung schließen. Es stellt sich die Frage, ob bei der Bewegungsanalyse eine globale Komponente lokalen Ursprungs vorhanden ist, und wie sie nachzuweisen ist. Die Aufklärung dieser Analysestrukturen kann wertvolle Hinweise und Anregungen für Anwendungen im Bereich der Robotik und Bildcodierung geben.

Als Analysemechanismen sind rezeptive Felder denkbar, die im x - y - t Raum der Bewegungswahrnehmung liegen. In Analogie zur lokalen Ortsfrequenzanalyse lassen sich Gaborfunktionen mit einer elliptischen Einhüllenden auf diesen Raum übertragen. Dazu ist dann die Unschärferelation entsprechend zu modifizieren. Objektbewegungen entsprechen dann Orientierungen im x - y - t Raum, die von rezeptiven Feldern mit elliptischen Gaborprofilen detektiert werden können (siehe auch ADELSON, 1985). In einem Adaptationsexperiment



wird der Versuch unternommen, neurophysiologische Ergebnisse zur Orientierungsabhängigkeit von kortikalen Zellverbänden auch bei psychophysikalischen Experimenten im menschlichen visuellen System nachzuweisen. Damit kann in einem psychophysikalischen Experiment die Relevanz der Ergebnisse aus neurophysiologischen kortikalen Zellableitungen bestätigt werden. Aus dem im Experiment gewonnenen Wert der Unschärferelation bei einer lokalen Ortsfrequenzanalyse mit elliptischen Gaborfunktionen sollte man dann durch Vergleich mit dem theoretischen Minimum eine Aussage über die Zulässigkeit und gegebenenfalls die Qualität der Beschreibung der Zellantworten mit diesen Gaborsignalen erhalten und somit auch die Übertragung der Feldprofile in den Bewegungsraum rechtfertigen.

Kapitel 2 der Arbeit stellt die Bewegungswahrnehmung als eigenständigen Sinneseindruck vor und beschreibt aktuelle Modelle sowie neuronale Strukturen zur Analyse von Bewegungen. Der experimentelle Aufbau wird in Kapitel 3 vorgestellt. Auf die verschiedenen Meßmethoden zur Bewegungswahrnehmung, die in den Experimenten Verwendung finden, geht Kapitel 4 ein. Kapitel 5 enthält nach den Meßmethoden Verschiebungsschwellen und Reaktionszeiten aufgetrennte Beschreibungen zum Aufbau und zu den Auswerteverfahren der Experimente, sowie jeweils einen Diskussionsparagrafen. In Kapitel 6 werden die Ergebnisse diskutiert und durch Kontrastschwellenexperimente mit einem Balkenobjekt und mit elliptischen Gaborfunktionen weiter ausgebaut. Die Bedeutung von Augenbewegungen für das Erkennen von Bewegungen verdeutlichen die Ergebnisse des Experiments aus Kapitel 6.3. In Kapitel 6.5 wird die Ausbreitung einer lokalen Bewegungsinformation modelliert.

2. Bewegungswahrnehmung als eigenständiger Sinneseindruck

Von der Physik aus betrachtet läßt sich der Bewegungswahrnehmung keine besondere Rolle zuschreiben. Sie könnte als einfache Verschiebung eines Bildes in der Zeit aufgefaßt werden. In der Psychophysik wird jedoch seit langem die Frage diskutiert, ob es sich bei der Bewegungswahrnehmung um eine ähnliche phänomenologische Dimension handelt wie es bei der Farbwahrnehmung und dem Stereosehen nachweislich der Fall ist (NAKAYAMA, 1985). Farbe kann als eine spontane Erfahrung bezeichnet werden, und die Wahrnehmung einer räumlichen Tiefe ist nicht veränderbar.

Einige Autoren gestehen der Bewegungswahrnehmung immer noch keinen fundamentalen Charakter zu und betrachten sie als einen Prozeß, der sehr spät im visuellen System entsteht und nur einen elementaren gedanklichen Vorgang darstellt. DIMMICK (1930) und KINCHLA (1969, 1976) zeigen, daß man Bewegungsschwellen in Form eines Ortsspeichers in der Zeit auffassen kann.

Die Vielzahl der Experimente und Effekte lassen heute jedoch keinen Zweifel mehr an der grundlegenden Dimension der visuellen Bewegungswahrnehmung. Sie stellt eine sensorische Eingangsgröße dar, die nicht weiter zerlegt werden kann. Am deutlichsten spiegelt sich dies in den Bewegungsnachwirkungen wieder. Nach der Adaptation an eine Bewegung entsteht beim Betrachten des stationären Bildes eine Bewegung in entgegengesetzter Richtung. Es erfolgt eine Auftrennung von Bewegung und Ort (GREGORY, 1966).

Die Vielseitigkeit der Dimension Bewegungsverarbeitung unterstreicht NAKAYAMA (1985) in seinem Übersichtsartikel. So ist es zum Beispiel möglich, nur durch Bewegungen einen stereoskopischen Eindruck zu vermitteln, oder, ohne Kenntnis von Objektentfernung und Beobachtergeschwindigkeit, allein aus der Verteilung der scheinbaren Geschwindigkeiten eines bewegten Bildes, den Zeitpunkt des Zusammentreffens von Objekt und Beobachter zu ermitteln. Bewegungen dienen auch als Eingangsgrößen für andere Sinneseindrücke. (Der abfahrende Zug auf dem Nachbargleises im Bahnhof täuscht eine eigene Bewegung vor.) Das Gleichgewichtsorgan wird ebenfalls entscheidend von den Bewegungen der visuellen Umwelt geprägt. Experimente in der Schwerelosigkeit versuchen diese Zusammenhänge aufzudecken (MERBOLD, 1984).

Auf die Wechselwirkungen von Bewegungen und Augenbewegungen wird in einem gesonderten Kapitel eingegangen.

Seit langem ist bekannt, daß bei einem stationären Netzhautbild, das durch Kompensation bewußter und unbewußter Augenbewegungen erreicht wird, jeglicher Sinneseindruck verschwindet. KELLY (1979) demonstriert mit seinem Experiment neben negativen auch positive Einflüsse der Bewegungswahrnehmung

auf die Mustererkennung. Mit netzhautstabilisierten Sinusgittern kann er nachweisen, daß bei Bewegung des Gitters mit 3"/s alle Informationen jenseits einer Ortsfrequenz von 8 cpd zwar verloren gehen, niedrige Ortsfrequenzen jedoch eine Verbesserung der Erkennbarkeit erfahren, oder überhaupt erst durch die Bewegung sichtbar werden.

Nicht zuletzt dient die Bewegungswahrnehmung natürlich auch der Erkennung von real bewegten Objekten. Die Beziehungen zwischen Bewegungen im retinalen Bild und dem dazugehörigen Bewegungseindruck können von sehr komplexer Natur sein. Retinabildbewegungen müssen nicht immer einen Bewegungseindruck erzeugen (GIBSON 1968); die Umkehrung kann ebenfalls beobachtet werden (ROGERS, 1982).

Alle diese beschriebenen Effekte lassen sich sicher nicht mit einem Mechanismus erklären. Vielmehr liegt es nahe, eine Reihe von Erkennungssystemen zur Beschreibung heranzuziehen. Jedes dieser Systeme übernimmt unter Umständen auch nur Teile der Verarbeitung bei den verschiedenen Bewegungseffekten. Daß die Systeme sehr unterschiedlich sein müssen, stellt COLLEWIJN (1982) fest. Zur Objekt-Hintergrund-Trennung durch Bewegungen ist ein hoher Grad an retinaler Auflösung und Organisation nötig, während zur Rotationsstabilisierung des Auges eine Erkennung langsamer Geschwindigkeiten, verteilt über das gesamte Gesichtsfeld, unerläßlich ist. Die retinale Auflösung ist im zweiten Fall nur von untergeordneter Bedeutung. HOFFMAN (1982) hat bei Katzen zwei Bewegungsmechanismen isoliert, die die oben geforderten Eigenschaften erfüllen können. Zum einen ein kortikales System, das in der Lage ist Bewegungen an verschiedenen lokalen Orten des Gesichtsfeldes zu messen, zum anderen einen Mechanismus (accessory optic system), der die mittleren Bewegungen global über das Gesichtsfeld analysiert. In weiteren Arbeiten zeigen sich, obwohl beide Systeme getrennt sind, Hinweise auf eine gegenseitige Wechselwirkung von lokaler und globaler Analyse (HOFFMAN, 1982; GRASSE, 1984).

2.1 Modelle zur Bewegungswahrnehmung

Das Ausgangsmodell für viele weitere alternative Modelle zur Bewegungswahrnehmung stammt von REICHARDT (1961) und beschränkt sich auf eine lokale Analyse. Reichardt wendet die Prinzipien der Systemanalyse auf das Verhalten von Insekten an und beschreibt die Bewegungsverarbeitung benachbarter Zellen in einem Minimalmodell:

$$V = \frac{1}{T} \cdot \int_{-T/2}^{T/2} R_1(x_1, t) \cdot R_2(x_2, t-\tau) d\tau \quad (1)$$

Die Geschwindigkeit einer Bewegung errechnet sich aus der Autokorrelationsfunktion der Reizfunktionen R_1 und R_2 für benachbarte Orte x_1 und x_2 . T ist die Integrationszeit des Systems. Bild 2.1.1 zeigt schematisch das De-

tektormodell. Ein Balken bewegt sich von links nach rechts über beide Sensoren. Der Reiz wird erkannt und, örtlich wie auch zeitlich durch eine Reizfunktion gefiltert, zu einer Operatorstufe geleitet. Der Wert nach der Integrationsstufe am Ausgang des Detektors ist gemäß Gleichung (1) proportional zur Geschwindigkeit V . Auf der Ebene des Operators ist gleichzeitig eine Erkennung der Bewegungsrichtung möglich. Der Detektor in Bild 2.1.1 kann nur eine Bewegung nach rechts erkennen.

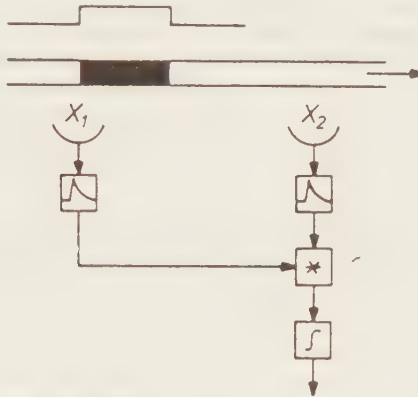


Bild 2.1.1: Schematisches Modell eines Bewegungsrichtungsdetektors nach REICHARDT (1961). Das Eingangssignal eines bewegten Leuchtdichtesprungs wird erkannt und an die Operatorstufe () weitergeleitet. Eine Integration liefert dann das Ausgangssignal des Detektors.*

In vielen Experimenten kann ein richtungsspezifisches Verhalten der Bewegungsmechanismen beobachtet werden (z.B.: ALBRIGHT, 1984; GREEN, 1983; LEVINSON, 1979). Daher liegt es nahe Reichardt-Detektoren, die für Bewegungen nach links und rechts empfindlich sind, zu einem Opponent-System zusammenzufassen. In der einfachsten Form geschieht dies durch Differenzbildung der Ausgangssignale. Die meisten Modellvarianten diskutieren die Art der (nichtlinearen) Operatorstufe (Multiplikation, logisches UND, ...) mit der sich die besten Resultate erzielen lassen.

ADELSON (1985) weist darauf hin, daß es möglich ist durch Erweiterung des Reichardt-Modells um eine Verarbeitungsstufe, die richtungsabhängige örtliche und zeitliche Bewegungsenergien berechnet, einige grundlegende Phänomene der Bewegungswahrnehmung richtig vorherzusagen (ANSTIS, 1980; ANSTIS, 1975; ADELSON 1982). Mit der Energiebetrachtungsweise kann ein Detektor modelliert werden, dessen Ausgangssignal direkt mit der Bewegung korreliert ist und für eine konstante Bewegung einen konstanten Wert besitzt. Andere Modelle liefern hier, je nach Orientierung der Bewegung über dem rezeptiven Feld des Detektors, positive oder negative Werte. Eine energiebezogene Ant-

wort produziert für helle Objekte auf dunklem Hintergrund das gleiche Signal wie für dunkle Objekte auf hellem Hintergrund. Insbesondere ist die Energieantwort auf ein bewegtes Sinusgitter konstant und in Übereinstimmung mit dem Verhalten vieler komplexer Zellen im neuronalen Netz und dem glatten und unveränderlichen Sinneseindruck auf eine Bewegung.

Die Orts- und Zeitfilter der Detektoren werden in fast allen Modellen mit einer Laplace-Gaußfunktion, der Differenz zweier Gaußfunktionen oder geraden und ungeraden Gaborsignalen gebildet. Die in psychophysikalischen und neurophysiologischen Experimenten festgestellten Bandbegrenzungen in Ort und Zeit sind damit mathematisch nachvollziehbar. Eine Bandbreitenbegrenzung im Ort verhindert zudem Aliasing-Fehler, die nach dem Reichardt-Modell entstehen müssen, wenn die halbe Periode der dominierenden Ortsfrequenz eines gleichmäßig bewegten Musters kleiner als der Detektorabstand wird: Aliasing-Fehler sind bei der visuellen Bewegungswahrnehmung nicht zu beobachten.

MARR (1981) formuliert mit Hilfe von Ortsfrequenzfiltern einen plausiblen Algorithmus nach einem Ort-Zeit-Gradienten-Modell, das auf der Beziehung

$$\frac{dL(x,y,t)}{dt} = 0 \quad (2)$$

basiert. Gleichung (2) bedeutet, daß bei der Bewegung eines Musters die Helligkeit L eines bestimmten Punktes (x,y) konstant bleibt. Die Anwendung der Kettenregel für die Differentiation liefert

$$\frac{\partial L}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{\partial L}{\partial y} \cdot \frac{dy}{dt} + \frac{\partial L}{\partial t} = 0. \quad (2a)$$

Setzt man nun dx/dt gleich V_x und $dy/dt = V_y = 0$, so ergibt sich die Ausgangsgleichung für das Gradienten-Modell zu

$$V_x = \frac{dL(x,t) / dt}{dL(x,t) / dx}. \quad (2b)$$

Die Geschwindigkeit in x -Richtung V_x kann aus dem Quotienten der lokalen zeitlichen und örtlichen Gradienten der Helligkeitsverteilung $L(x,t)$ bestimmt werden (siehe auch HADANI, 1980; HORN, 1981). MARR (1981) berechnet in einem ersten Schritt die Faltung der Helligkeitsverteilung des Bildes mit der zweiten Ableitung einer Gaußfunktion. Die zeitlichen Veränderungen der so entstandenen Nullstellen (Zero-Crossings) signalisieren die Bewegungen im Originalbild. Lokale Mechanismen bestimmen aus dem Vorzeichen dieser Ableitung die Richtung der Bewegungen. Aus dem Verhältnis der Nullstellen von Bewegungen gleicher Richtung und ihrer Gesamtzahl kann die Stärke der wahrgenommenen Bewegung für die Richtung ermittelt werden (BISCHOF, 1985).

Im Gegensatz zu allen anderen bisherigen Modellansätzen, beschreibt WATSON (1983) einen linearen Bewegungsdetektor der in der Ebene von Orts- und Zeitfrequenz arbeitet. Ein Punkt dieser Ebene markiert ein bewegtes

Sinusgitter und kann leicht mit einem Detektor erfaßt werden. Das Ausgangssignal von zwei solchen Detektoren wird dann einfach nur addiert. Konstante Geschwindigkeiten bilden in dieser Darstellung Geraden durch den Ursprung. Rezeptive Felder, die längs der Geraden angeordnet sind, repräsentieren einen speziellen Geschwindigkeitskanal mit entsprechenden Orts- und Zeitfiltercharakteristiken.

Für alle Modelle gilt: Eine metrische Angabe der Geschwindigkeit ist nur durch einen Vergleich mit allen im Bild existierenden Bewegungen möglich und kann nicht direkt vom Detektor bestimmt werden. Eine Geschwindigkeitsbestimmung muß im neuronalen Netz auf einer weiteren, höheren Verarbeitungsstufe stattfinden.

2.2 Neuronale Hardware für die Bewegungswahrnehmung

Die Isolierung von kortikalen Zellen, die ausschließlich an einer Bewegungserkennung beteiligt sind, erweist sich als recht schwierig, da durch eine Bewegung viele Rezeptoren überstrichen und nachgeschaltete Stufen aktiviert werden, die auch andere Verarbeitungsaufgaben erfüllen (BARLOW, 1964). Bewegungsempfindliche Neurone ändern ihre Pulsrate nur bei Änderungen der Bewegungsgeschwindigkeit oder -richtung. GRÜSSER (1973) zeigt, daß Neurone existieren, die nicht nur für Bewegungen, sondern auch für Kontrast und Größe des beleuchteten Gebietes empfindlich sind. Die Kombination von Kontrast, Zeitfrequenz, Ortsfrequenz und Geschwindigkeit als maßgebliche stimulierende Parameter eines Neurons sind von HOLUB (1981) und ALBRECHT (1982) nachgewiesen worden.

Viele neurophysiologische Ergebnisse unterstützen die These, daß die Mehrzahl der relevanten Informationen für die Verarbeitung von Bewegungssignalen aus Zellschichten des LGN (lateral geniculate nucleus; seitlicher Kniehöcker) kommen. Im LGN lassen sich X- und Y-Zelltypen unterscheiden. Da Y-Zellen bevorzugt auf zeitliche Reize antworten, wurde ihnen lange Zeit die Vermittlung von Bewegung zugeschrieben (TOLHURST, 1973). Die Y-Zellen sind jedoch nicht für eine örtliche Phase empfindlich. NAKAJAMA (1985) folgert daraus, daß nur die etwa 15 % X-Zellen des LGN die Vorstufe zur weiteren Bewegungsanalyse bilden. Von ihnen gehen Verbindungen in den gestreiften Cortex (V5) der Sehrinde in Area 17. Als weiteres Gebiet, das zur schnellen Bewegungsverarbeitung im Gehirn beiträgt, ist die "middle temporal area" (MT) von vielen Autoren untersucht worden (MAUNSELL, 1983; ALBRIGHT, 1984). Zellableitungen zeigen hier eine besonders ausgeprägte Bewegungsrichtungsabhängigkeit. Des weiteren finden sich Hinweise auf die Verarbeitung von Folgebewegungen der Augen. NEWSOME (1983) berichtet von Experimenten, die den Schluß zulassen, daß im MT Zellen existieren, die im Orts- Zeitfrequenzraum konstante Geschwindigkeiten (Geraden) mit vielen verschiedenen Orts- und Zeitfrequenzen aufgrund ihrer Orientierung erkennen und darauf rea-

gieren. Dies bildet einen höheren Prozeß, der trotz großer Variationen in den Orts- und Zeitfrequenzen eine abstrakte Geschwindigkeit ermittelt.

Von der MT ausgehend können noch weitere Gebiete im Gehirn mit der Bewegungswahrnehmung verbunden werden. Eine genaue Spezifizierung ihrer Aufgaben und der Wechselwirkungen liegt jedoch in ferner Zukunft.

3. Experimenteller Aufbau

Bisherige Versuchsaufbauten für psychophysikalische Experimente waren nicht vielseitig verwendbar, so daß alle Versuche ihren eigenen, immer wieder verschiedenen Aufbau benötigten. Ebenfalls ist die Vergleichbarkeit der Ergebnisse, die mit den apparativen Aufbauten erzielt werden, nur eingeschränkt möglich, da jede Apparatur andere Justier- und Eichgrößen benutzt. Keine dieser Meßanordnungen war universell einsetzbar und somit unabhängig von den experimentellen Anforderungen. Ziel war es somit, ein System zu entwickeln, das den Forderungen nach Universalität Rechnung trägt.

Der Farbmustergenerator (FMG) erlaubt es, alle gegenwärtig in der Literatur gängigen experimentellen Aufbauten zu ersetzen. Darüber hinaus gibt er dem Experimentator eine Schaar völlig neuer Möglichkeiten in die Hand, die bis heute noch nicht vollends ausgeschöpft werden konnten.

Für die am Institut für medizinische Optik durchgeführten Forschungsarbeiten zur Funktion des menschlichen visuellen Systems werden zeitlich-variable, örtlich-zweidimensionale Farb- und Helligkeitsmuster benötigt. Eines der Forschungsziele ist die Frequenzganganalyse des visuellen Systems. Hierfür werden elementare Musterstrukturen benutzt, wie z.B. Gitter mit verschiedenen Profilen, Orientierungen, Frequenzen und Kontrasten. Um den mathematischen Apparat der linearen Systemanalyse anwenden zu können, sind bei endlich ausgedehnten Raumzeitmustern Hüllkurven erforderlich mit deren Hilfe das Frequenzspektrum dieser Muster begrenzt werden kann (z.B. Gaborfunktionen). Die Vielfalt der bereitzustellenden Muster kann nicht mit einer nach üblichen Methoden aufgebauten Apparatur realisiert werden.

Die traditionellen Meßaufbauten lassen sich wie folgt charakterisieren: Die Beleuchtung der Testmuster erfolgt mit von Monochromatoren gefiltertem Licht oder durch, in einem Farbmischgerät (Farbfilter und Uibrichtkugel) gemischtem, Licht einstellbaren Farbortes. Die Intensität wird dabei durch Graukeile oder Polarisationsfilter eingestellt. Mechanische Blendenverschlüsse schalten die Beleuchtung ein und aus. Die Testmuster bestehen aus Diapositiven oder teilverspiegelten Glasscheiben. Die Möglichkeiten zur zeitlichen Beeinflussung der Muster (z.B. Bewegung und zeitliche Kontrast- und Farbvariationen) sind hierbei naturgemäß sehr beschränkt. Auch eine homogene Ausleuchtung der Testmuster ist oft nicht in befriedigendem Maße erreichbar.

All diese Unzulänglichkeiten sind durch die Weiterentwicklung sowohl der Hard- als auch Software des in meiner Diplomarbeit (GERBER, 1982) in den Grundzügen aufgebauten computergesteuerten Farbmustergenerators (FMG, beseitigt worden (siehe auch GERBER, 1984).

3.1 Laborausstattung

Bild 3.1.1 gibt einen Überblick über den Standardmeßaufbau. Der Versuchsperson werden auf einem Farbmonitor mit Studioqualität die vom Farbmustergenerator erzeugten Testmuster präsentiert. Unter Umständen ist die Korrektur der chromatischen Abberation des Auges und die Beobachtung von Augenbewegungen während eines Experiments unerlässlich. Mit dem Fernrohr (F; siehe auch PULVERMACHER, 1982) und dem Infrarotspiegel (S) sowie der Kamera (K) mit der Steuereinheit (ABA; siehe auch LAUTENSCHLAGER, 1980; SCHWAB 1983; FELDHÜTTER, 1985; JÜTTNER, 1987) lassen sich diese Zusatzbedingungen lösen. Die Versuchsperson (VP) kommuniziert über das intelligente Versuchsinterface (IVI; siehe auch SAJUK, 1980) mit dem Versuchsleiter oder direkt mit den Steuerprogrammen von FMG und ABA.

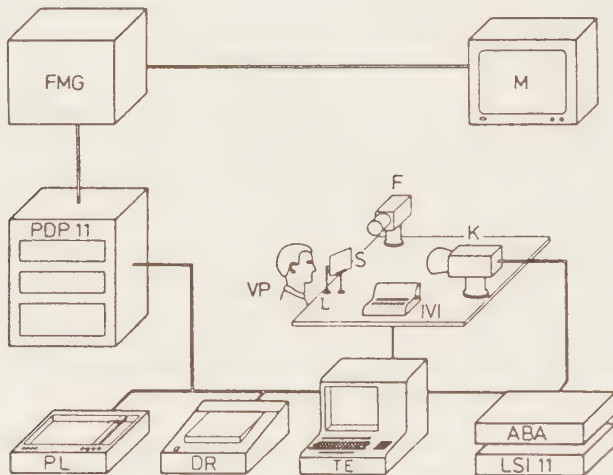


Bild 3.1.1: Experimenteller Aufbau.

ABA	: Apparatur zur Messung der Augenbewegungen
F	: Fernrohr zur Korrektur der chromatischen
	: Abberation des Auges
FMG	: Farbmustergenerator
IVI	: intelligentes Versuchsinterface
K, L	: IR - Kamera, IR - LEDs
M	: Farbmonitor
S	: IR - durchlässiger Spiegel
VP	: Versuchsperson
PDP11, LSI11	: 16 - Bit Prozeßrechner
DR, PL, TE	: Drucker, Plotter, Terminal

Während eines typischen Versuchsablaufs werden einer Versuchsperson Muster dargeboten. Anschließend wird eine Bewertung von der VP verlangt, oder es wird ein vorgegebener Musterparameter variiert, bis ein bestimmtes

Bewertungskriterium erreicht ist. Die Verbindung zwischen Versuchssteuerrechner mit dem Meßprogramm und der Versuchsperson stellt ein mikroprozessor-gesteuertes Interface her. Dies besitzt Antworttasten, eine Pseudoanalogeingabe, ein alphanumerisches Display und einen Tongenerator. Die Pseudoanalogeingabe besteht aus einem digitalen Winkelcodierer, dessen Auflösung und Nullstellung programmiert werden können. Das alphanumerische Display dient zur Ausgabe von Anweisungen an die Versuchsperson und zur Bezeichnung der Antworttasten. Der Tongenerator liefert ein akustisches Triggersignal um die Aufmerksamkeit der VP auf bestimmte Ereignisse im Versuchsablauf zu lenken (SAJUK, 1980).

Für die Darstellung der elektronisch erzeugten Muster wird ein Farbmonitor (M) hoher Qualität verwendet. Er besitzt RGB - Videoeingänge und eine Bildschirmdiagonale von 0.5 m. (Weitere Daten sind aus dem Anhang zu entnehmen.)

Die analogen RGB - Videosignale für den Farbmonitor werden von 3 Video-Digital-Analogwandlern aus einem digitalen Videosignal von $3 \cdot 10$ Bit Breite erzeugt. Dieses digitale Videosignal liefert der elektronische Farbmustergenerator, der aus Bildspeichern, Farbkodiertabellen, Funktionsspeichern und einem schnellen Pixelprozessor besteht. Die Bedienung erfolgt über einen Prozeßrechner PDP11/24 mit dem RSX11M Mehrbenutzer-Echtzeit-Betriebssystem und einem speziellen Geräte-Treiber. Für die Programmierung der Versuchssteuerungs- und Auswertprogramme wird RATFOR, ein durch einen Preprozessor erweitertes Fortran verwendet. Der Farbmustergenerator ist durch ein spezielles Interface (CAMAC) mit dem Prozeßrechner verbunden.

3.2 Mathematische Beschreibung der Muster; typische Muster

Das Farbmuster ist im Allgemeinen eine zeitlich variable, örtlich zweidimensionale, wellenlängenabhängige Intensitäts- oder Leuchtdichteverteilung:

$$\text{Reiz: } I(\lambda, x, y, t)$$

Verzichtet man auf die maximal gesättigten Spektralfarben, so kann man die Spektralverteilung auf Grund der Trichromasie des menschlichen Farbensehens durch drei Farbvalenzen ersetzen.

$$F_k = \int I(\lambda, x, y, t) \cdot E_k(\lambda) \cdot d\lambda \quad , \quad k = \text{rot, grün, blau}$$

F_k : Leuchtdichte eines Flächenelements
 E_k : Spektralverteilung einer Farbvalenz

Da das visuelle System eine zeitliche und örtliche Bandbegrenzung durchführt, kann der Reiz F nach dem Abtasttheorem in den Orts- und Zeitkoordinaten diskretisiert werden. Dies ist die Grundlage für die Darstellung des Farbmusters F mittels eines Raster-Scan-Displays.

Für die meisten Versuche lassen sich die benötigten Muster durch Parametrisierung spezialisieren:

$$M(x, y, t, p_1, p_2, \dots, p_n)$$

mit $\langle p_1, \dots, p_n \rangle$ als Musterstruktur bestimmende Parameter

Diese Parameter können dann z.B. Kontrast, Frequenz, Farbort oder auch Funktionen davon sein. In einem typischen Experiment wird zum Beispiel durch die Versuchsperson ein Parameter p so eingestellt, daß im Muster gerade eine Veränderung erkennbar wird (Schwellenbestimmung für p).

Durch die Einführung einer skalaren Funktion $s(x, y, t)$ werden die Freiheitsgrade der darstellbaren Muster nochmals reduziert.

$$M(s(x, y, t), p_1, p_2, \dots, p_n)$$

$s(x, y, t)$ beschreibt einen Weg auf einer Kurve im dreidimensionalen Farbraum. Diese Spezialisierung der Muster hat einen erheblich verringerten apparativen Aufwand bei ihrer Berechnung zur Folge. Für die häufig durchgeführten Kontrastschwellenmessungen ist diese Spezialisierung sogar notwendig. Die Anzahl der in Echtzeit durchzuführenden Rechenoperationen ist durch die zur Verfügung stehende Rechenleistung begrenzt. Hieraus ergeben sich gewisse Einschränkungen hinsichtlich der darstellbaren Strukturfunktionen $s(x, y, t)$.

Eine weitere erhebliche Reduzierung der Freiheitsgrade erhält man, wenn die Strukturfunktion, die von drei Koordinaten abhängt, durch einen arithmetischen Ausdruck darstellbar ist, der nur Funktionen enthält, die jeweils eine einzige Koordinate enthalten. Dies ist der Fall, wenn die Strukturfunktion separierbar ist.

$$s(x, y, t) = f(x) \cdot g(y) \cdot h(t) + k(t)$$

Hängt s sogar nur von der Ortskoordinate ab, so ist ihre Darstellung mit minimalem Hardwareaufwand möglich, da für jede Bildzeile nur ein einziger Wert zur Verfügung gestellt werden muß.

$$s(x, y, t) = g(y, t)$$

Im Folgenden sollen einige typische Muster beschrieben werden, die in vielen psychophysikalischen Experimenten benutzt werden.

Die für die Frequenzganganalyse erforderlichen Muster haben z.B. die Form:

$$s(x, y, t) = k \cdot \text{fun}(Q_t \cdot t + Q_x \cdot x + Q_y \cdot y + \Phi) \quad : \text{bewegtes Gitter}$$

oder

$$s(x, y, t) = k \cdot \text{fun}(Q_t \cdot t) \cdot \text{fun}(Q_x \cdot x) \quad : \text{flimmerndes Gitter}$$

mit

$$\begin{array}{ll} \text{fun} & = \sin, \text{ rect, Dreieck, Säge} \\ k & : \text{verallgemeinerter Kontrast} \end{array}$$

Auch aperiodische Funktionen wie Balken, Kreis- und Sektorflächen werden bei Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen verschiedenen lokalisierten Reizen eingesetzt. Die in vielen Fällen erforderliche Begrenzung des Reizes in Ort, Zeit und Frequenz wird durch Modulation des Musters mit einer Hüllkurve (Rampen, Trapeze, Gaußfunktionen, $\cos^2$ -Funktionen) erreicht.

Eine Alternative zur Verwendung periodischer Funktionen bei der Frequenzanalyse ist die Benutzung bandpaßgefilterten Rauschens. Zur Untersuchung der Signaldetektion bei Anwesenheit von Störungen mit einstellbarem Signal - Rauschverhältnis und Leistungsspektrum oder Korrelationseigenschaften sind stochastische Muster erforderlich.

Ein universell einsetzbarer Bildgenerator muß alle oben angeführten Muster und deren zeitliche Variationen erzeugen können. Da in psychophysikalischen Versuchen Eingriffe in die Muster in Abhängigkeit vom Versuchsverlauf notwendig sind, muß die Apparatur anhand einer parametrischen Beschreibung die Muster in Echtzeit erzeugen und verändern können. Mit einem Filmplotter o.ä. ist dies nicht möglich.

Erste Ansätze einer Bilderzeugung auf elektronischen Weg beschreibt MILKMAN (1978). Er manipuliert die analogen Signale für ein Oszilloskop. Eine Ausgabe von Farben ist hier natürlich nicht möglich. Die darstellbaren Muster sind auf zweidimensional separierbare Funktionen beschränkt. WITTEBROOD (1981) stellt einen Farbmustergenerator auf Bildspeicherbasis vor. Die Ausgangssignale der Bildspeicher steuern über Farblookuptabellen RGB-Signale eines Farbmonitors. Die Möglichkeiten von unabhängigen Musterbewegungen in Echtzeit sind hier ebenfalls nicht gegeben.

3.3 Hardware-System

Die Hardware besteht aus 3 in wire-wrap Technik entwickelten CAMAC - Einschubmodulen, die den Pixelprozessor, die Farb- und Funktionsspeicher sowie das Interface zum CAMAC - Bus und die zur Steuerung des Systems notwendige Logik enthalten. Bild 3.3.1 zeigt die einzelnen Module des Farbmustergenerators mit Digital - Analogwandler und Farbmonitor.

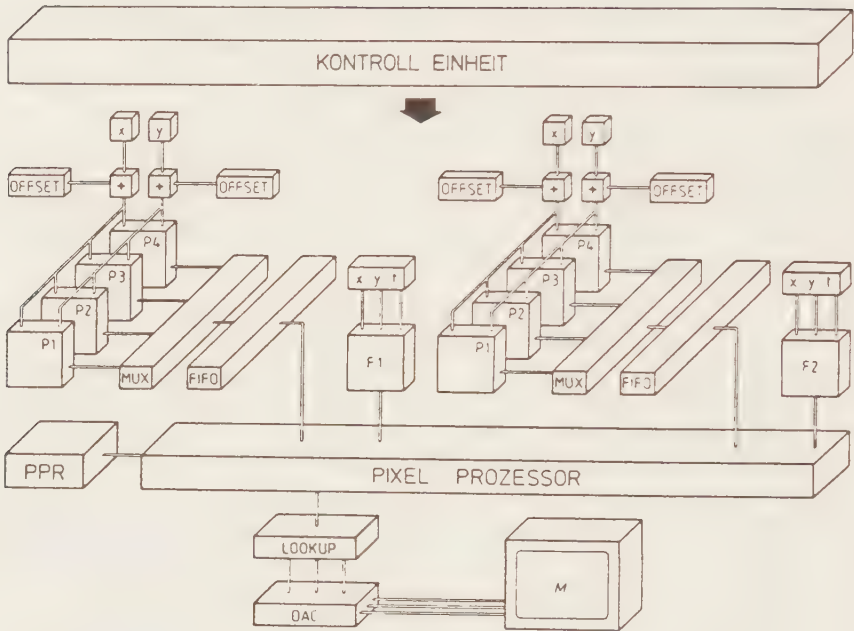


Bild 3.3.1: Blockschaltbild des Farbmustergenerators mit Digital-Analogwandler und Farbmonitor.

DAC	: Digital - Analogwandler
F1, F2	: Funktionsspeicher jeweils 256x8 Bit
FIFO	: First-in First-out Datenbuffer
Lookup	: 3 Farbspeicher mit je 256x10 Bit
M	: Farbmonitor
MUX	: Datenmultiplexer
P1...P4	: 2x4 Bildspeicher jeweils 256x256x8 Bit
PPR	: Pixelprogrammregister
x,y,t	: Koordinaten

Der Pixelprozessor (PP) erhält seine Eingangsdaten aus den 2x4 Bildspeichern (P1...P4) und den beiden Funktionsspeichern (F1, F2). Die am Ausgang des PP in Echtzeit entstehenden Daten adressieren Farbkodiertabellen (Lookup). Bild 3.3.2 zeigt schematisch den Aufbau des Pixelprozessors. Er kann bis zu vier Operanden mit maximal vier arithmetischen oder logischen Operatoren verknüpfen. Die Pixelprozessorsteuerung (Pixelprogrammregister PPR) besteht aus vier Feldern für die Auswahl der einzelnen Operatorfunktionen und einem Feld zur Festlegung des Datenweges innerhalb des Pixelprozessors. Ein solcher Datenpfad ist mit einem arithmetischen Klammerausdruck verwandt, in dem zwei Funktionen und zwei zweidimensionale Bilder die Operanden darstellen. Durch Verzicht auf redundante Verknüpfungen, die in den prinzipiell

möglichen Kombinationen von 4 Operatoren und 4 Operanden enthalten sind. kann der elektronische Aufwand auf ein realisierbares Maß beschränkt werden. Die Datenrate des Prozessor entspricht der Video - Datenrate von 7.4 Mbyte/s.

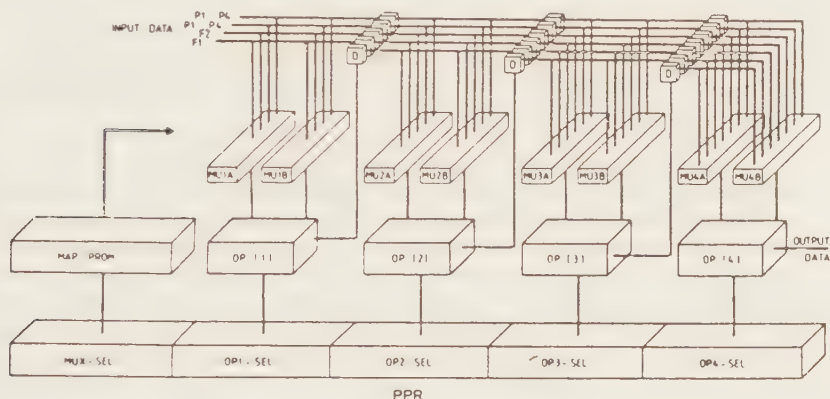


Bild 3.3.2: Pixelprozessor des Farbmustergenerators.

D : Verzögerungseinheit (1 Pixel)
 MAP - PROM : Operator- und Datenpfadsteuerprogramm
 MUX1A...MUX4B : Datenmultiplexer
 OP(1)...OP(4) : Operatoren
 : mögliche arithmetische Operationen:
 : Addition, Subtraktion, Multiplikation
 : mögliche logische Operationen:
 : Negation, Konjunktion, Disjunktion
 PPR : Pixelprogrammregister

Der Bildspeicher ist in zwei Gruppen eingeteilt, die jeweils vier Bilder enthalten (siehe Bild 3.3.1). Zwei Bilder, je eines aus jeder der beiden Gruppen, können parallel mit Hilfe von Adressgeneratoren (x, y) ausgelesen werden (Datenrate 12.2 Mbyte/s). Die unterschiedlichen Arbeitsgeschwindigkeiten der Bildspeicher und des Pixelprozessors werden durch Zwischenspeicher (FIFOs) einander angepaßt. Die den beiden Bildspeichergruppen zugeordneten Adressgeneratoren ermöglichen das sequentielle Auslesen. Die Offset-Register bewirken eine zweidimensionale Bildverschiebung (Torus). Eine zeitabhängige Offset-Variation hat dann eine Bewegung des gesamten Bildinhaltes zur Folge.

Die Funktionen F1 und F2 können wahlweise ortsabhängig (Abhängigkeit von den Pixelkoordinaten x,y) oder zeitabhängig (Abhängigkeit von der Bildsequenz) sein. Je nach Pixelprogramm erzeugen die zeitabhängigen Funktionen Bewegungen oder zeitliche Modulationen der Farbmuster.

Die drei Farbspeicher (256x10 Bit) setzen die vom Pixelprozessor berechneten Werte der skalaren Strukturfunktion s und der Bilder in das digitale

RGB - Videosignal um. Der Pixelprozessor liefert 8 Bit, die die drei Speicher parallel adressieren. Mit einem Konstantenspeicher werden die Farbspeicher angewählt, wenn Bildpunkte außerhalb des quadratischen Bildbereichs von 256x256 Pixeln liegen. Damit kann die Farbe der verbleibenden Umgebung des Bildes selektiert werden.

Die drei Digital - Analogkonverter wandeln das digitale Videosignal (3x10 Bit aus der Farbkodiertabelle) in ein für die Ansteuerung des Farbmonitors geeignetes analoges RGB - Signal um.

Die zentrale Ablaufsteuerung übernimmt ein mikroprogrammiertes Steuerwerk. Ein 8 - Bit breites Mikroprogrammwort kontrolliert den Farbmuster-generator und koordiniert den Zugriff auf die einzelnen Komponenten. Ein Video-Synchron-Generator erzeugt die für eine Bildausgabe auf dem Monitor erforderlichen Signale. Für ein Bild sind bei einer Bildwiederholrate von 50 Hz 312 Zeilen zu schreiben. Da hierbei, im Gegensatz zum normalen Fernsehbild, kein Zeilensprungverfahren Verwendung findet, entsteht auch nicht das bei psychophysikalischen Experimenten störende Zwischenzellenflimmern von 25 Hz. Am Ausgang des Synchronsignalgenerators stehen Steuersignale für den quadratischen Bildausschnitt, für die Umgebung und für die Pipeline-Steuerung des Pixelprozessors zur Verfügung. Weitere wichtige Signale sind der Pixeltakt und ein Bildaustastsignal, das alle 20ms zur Synchronisierung des Programmablaufs über das CAMAC-Interface beim Betriebssystem des Steuerrechners einen Interrupt auslöst.

Der Rechner (PDP11/24) bedient den Farbmustergenerator über einen CAMAC-Crate-Controller. Damit lassen sich die Bild-, Farb- und Funktionspeicher und Steuerregister laden und auslesen. Der Pixelprozessor wird ebenfalls über dieses Interface programmiert.

Nach dem Sampling-Theorem ist zur fehlerfreien Darstellung eines abgetasteten bandbegrenzten Signals eine Abtastrate erforderlich, die größer oder gleich der doppelten Bandbreite dieses Signals ist. Wenn diese Voraussetzung nicht erfüllt ist, entstehen die Aliasingfehler. Dies bedeutet, daß bei der gegebenen Bildwiederholrate von 50 Hz Signale mit einer Grenzfrequenz von bis zu 25 Hz zur Darstellung gelangen können.

Der Monitorbildschirm enthält ein quadratisches Feld von 256 Zeilen mit jeweils 256 Rasterpunkten. Die örtliche Grenzfrequenz beträgt damit in Bildschirmeinheiten 128 Perioden pro Koordinate. Dies sind bei einer Kantenlänge des quadratischen Feldes von 0.27 m und einem Beobachtungsabstand von 4 m 34 Perioden pro Grad Sehwinkel.

Der durch die drei Phosphorfarbvalenzen des Monitors aufgespannte Teilraum des Farbenraumes ist für die Mehrzahl der Experimente zur visuellen Farbwahrnehmung ausreichend (GERBER, 1979; PERIZONIUS, 1987).

Da die Gammaentzerrung für den Monitor digital durchgeführt wird, ist für die Digital-Analogkonverter eine höhere Auflösung erforderlich als bei einer linearen Bildröhrenkennlinie. Der Farbmustergenerator verwendet insgesamt 30 Bit zur Ansteuerung der Bildröhre.

Die Nachleuchtdauer der Bildschirmphosphore muß zur Erzeugung eines definierten Kontrastes unter der Bildwiederholrate liegen. Die Phosphore des Farbmonitors haben Nachleuchtzeit von unter einer Millisekunde.

Als Erweiterungen der Meßapparatur sind zum einen die Verbesserung der Umfeldbedingungen, zum anderen direkte Ergänzungen des Farbmustergenerators denkbar. Eine mögliche FMG-Erweiterung ist der Einsatz eines Videorecorders, der, mit einem Bildspeicher versehen, einzelne FMG-Bilder speichern, und dann als Bildsequenz rechnergesteuert ablaufen lassen kann. Die Überwindung der zeitlichen Begrenzungen des Systems erlaubt die Entwicklung eines hochauflösenden Bildspeichers, in dem das digitale FMG-Ausgangssignal eingeblendet wird. Der HFMG (hochauflösende Farbmustergenerator, 1kx1k) arbeitet dann mit 200 Hz Bildwiederholrate und erlaubt somit auch Experimente zur Bewegungswahrnehmung, die bisher am zu groben zeitlichen Raster scheiterten (SAJUK, 1987).

3.4 Software-System

Einen Überblick über die Software-Schnittstelle des Farbmustergenerators gibt Bild 3.4.1. Die beschrifteten rechteckigen Felder symbolisieren Speicher und Register und können vom Steuer- und Meßprogramm ausgelesen und beschrieben werden, ohne daß eine Detailkenntnis der Hardwarevorgänge erforderlich ist. Die Implementierung in das Betriebssystem des Rechners erfolgt in Form eines Geräte-Treibers. Dabei stehen dann auch die erforderlichen Privilegien zur Verfügung, die einen Betrieb des Farbmustergenerators unter einem Mehrbenutzer-Betriebssystem zulassen. Hier lassen sich die auftretenden Echtzeitprobleme am besten lösen. Ein weiterer Vorteil eines Treibers ist die Möglichkeit, zusätzliche Hardware-Funktionen für einen Benutzer zu simulieren.

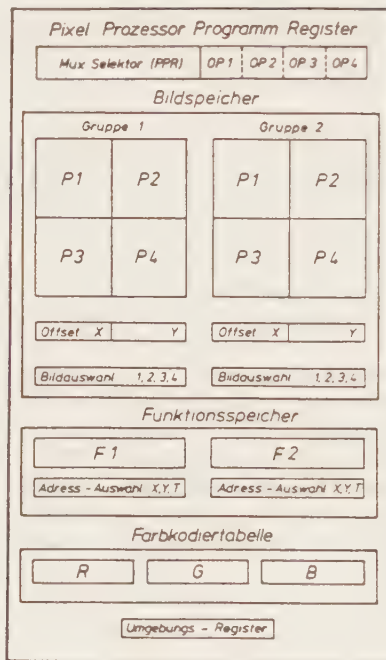


Bild 3.4.1: Software-Schnittstelle des Farbmustergenerators. Dem Benutzerprogramm stehen folgende Speicher und Register zur Verfügung:

Pixelprozessor-Programm-Register

- Multiplexer Selektor (PPR)
- Operatorsteuerung: OP1...OP4

Bildspeicher, Gruppe 1, Gruppe 2

- 256x256x8 Speicher P1...P4
- Offsetregister x, y
- Bildauswahl 1...4

Funktionsspeicher

- 256x8 Speicher F1, F2
- Adressquellenauswahl x, y, t

Farbkodiertabelle

- 256x10 Speicher, rot, grün, blau

Umgebungsregister

Die Verbindung zwischen Hard- und Software erläutert Bild 3.4.2. Der Geräte-Treiber (QA) ist im Betriebssystem des Rechners integriert. Er wird als eigenständiges Gerät mit der höchsten vom Betriebssystem (RSX11M) zu vergebenden Priorität angesprochen. Dadurch läßt sich sicherstellen, daß Operationen immer auf die Bildaustastlücke beschränkt bleiben können, und so keine Störungen auf dem Monitor zu sehen sind. Die zur Verfügung stehende

Zeit beträgt vom Ende der Ausgabe des quadratischen Bildausschnitts bis zum Anfang des ersten Pixels im neuen Bild ca. 6,5ms. Alle Manipulationen, die während des verbleibenden Restes der Bildwiederholrate von 14,5ms ausgeführt werden, können auf dem Monitor zu sichtbaren Störungen im Bildaufbau führen. In der nächst höheren Ebene befindet sich das Benutzerprogramm, das Parameterverwaltungsprogramm HANDLE, die Bibliotheken mit Unterprogrammen für die FMG-Bedienung und die Master-Slave Inter-Task-Kommunikation (Bild 3.4.2).

Die FMG-Bibliothek enthält alle zur Hardware-Steuerung nötigen Unterprogramme, die ein Benutzerprogramm ansprechen kann. Sie verwaltet die Schnittstelle zwischen QA-Treiber und Benutzer. Es werden fünf Ausführungsarten der Unterprogramme unterschieden, die sich alle auf eine synchrone oder asynchrone Bearbeitung bezüglich der Bildastasttakte beziehen. Tabelle 3.4.1 fasst diese zusammen.

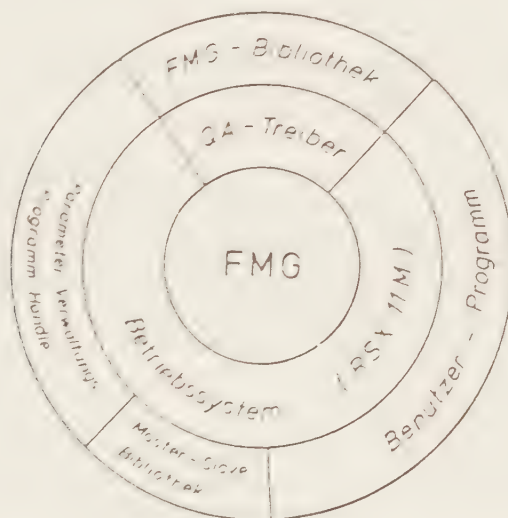


Bild 3.4.2: Hard- und Softwareverbindung zwischen Farbmüstergenerator, Betriebssystem des Rechners und Benutzerprogramm.

Ausführungsart	Beschreibung
asynchron	Befehl wird sofort ausgeführt
synchron	Befehl wird verzögert bis zur nächsten Austastlücke, Benutzerprogramm läuft weiter.
synchron mit Verzögerung	Befehl und Benutzerprogramm werden bis zur Austastlücke und dem Ende des Befehls verzögert.
testen	Es wird getestet, ob ein synchroner Befehl beendet ist.
warten	Benutzerprogrammablauf wird verzögert, bis ein synchroner Befehl abgearbeitet ist.

Tabelle 3.4.1: Ausführungsarten der Unterprogramme der FMG-Bibliothek bezüglich der Bildaustastlücke. Weiterführende Details sind in GERBER (1985) zu finden.

Die elementaren Routinen der FMG-Bibliothek sind in Maschinensprache (MACRO-11) geschrieben. Zu komplexeren Unterprogrammen zusammengebunden können sie dann aus einer höheren Programmiersprache wie FORTRAN oder PASCAL aufgerufen werden. Daneben enthält die Bibliothek noch Trigger-Routinen, die Impulse über ein CAMAC-Output-Register an das intelligente Interface (IVI) zum Starten des Reaktionszeitzählers und an die Augenbewegungsapparatur (ABA) zur Markierung eines Bildanfangs geben.

Das Laden der Offset-Register x und y in Bild 3.3.1 kann außer durch das normale, einmalige Schreiben der Bildanfangskoordinaten auch mittels einer Funktion erfolgen, die an die Austastlücke gekoppelt ist. Der Benutzer übergibt dem Unterprogramm nur ein Feld, in dem die gewünschte zeitliche Reihenfolge der Koordinatenwerte steht. Der QA-Treiber zählt die Feldadresse alle 20ms hoch und setzt dann automatisch die dazugehörigen Werte ein. Dies geschieht nach der Übergabe des Feldes an den Treiber für das Benutzerprogramm völlig transparent. Es können daneben weitere FMG-Befehle gegeben werden. Auch die restlichen Betriebssystemfunktionen wie Plattenzugriffe oder die Bedienung anderer Benutzer bleiben uneingeschränkt erhalten.

Nutzt man beide Funktionsspeicher (F1, F2) einmal im Zeilenmodus (y Koordinate) und einmal im Pixelmodus (x Koordinate), so ist es möglich, eine Figur darzustellen, die sich in x und y separieren läßt: $s(x,y) = s1(x) \cdot s2(y)$. In Analogie zur Offset-Funktion erlaubt es eine FMG-Bibliotheksroutine, diese

Figur im Bildtakt zu bewegen. Insgesamt lassen sich also drei Objekte unabhängig von einander mit den Offset-Funktionen bewegen.

In den meisten psychophysikalischen Experimenten besteht ein fester zeitlicher Ablaufplan für die Reizdarbietung und dem Antworten der Versuchsperson. Das Queue-Management des QA-Treibers trägt dem folgendermaßen Rechnung. Der Benutzer kann eine Sequenz von synchronen FMG-Aufrufen eingeben, ohne daß diese wirklich ausgeführt werden (off-line). Die Sequenz läßt sich dann mit einem Befehl starten und wird genau in der vorher festgelegten Reihenfolge abgearbeitet, unabhängig vom aktuellen Zustand des Rechner-FMG-Systems und der Priorität des Programms. Eine solche Sequenz wird als Queue (Warteschlange) bezeichnet. Insgesamt erlaubt der QA-Treiber die Bedienung von 8 Queues gleichzeitig. Ausgewählte Queues können einzeln oder gemeinsam gestartet werden. Mit Verzögerungsbefehlen ist es möglich das parallele Ablaufen der Queues zu koordinieren. Sind die Sequenzen gestartet, so läuft das Benutzerprogramm weiter. Eine ausführliche Darstellung des Queue-Managements findet sich in GERBER (1985).

Eine weitere Eigenschaft psychophysikalischer Experimente ist ihre manchmal fast unübersehbare Anzahl von Parameter, die vor, während oder auch nach dem Experiment eine Änderung erfahren. Eine dynamische Verwaltung und ein wahrfreier Zugriff auf diese Variablen ist somit in den meisten Fällen unumgänglich. Zur Steuerung des Datenflusses werden oft verschiedene Kommandos benötigt, die mit den unterschiedlichsten Parametern gekoppelt sind. Da der Hauptspeicherbedarf von Programmen, die den Versuchsablauf steuern, erfahrungsgemäß immer sehr schnell anwächst, gibt es für eine komfortable Parameter Ein- Ausgabeverwaltung und Aufbereitung auf Prozeßrechnern des hier benutzten Typs nicht den nötigen adressierbaren Speicherplatz. Das Programm HANDLE erlaubt die speicherplatzsparende Verwaltung von Parametern und Kommandos. Durch das Ausnutzen der Eigenschaften des Multi-Tasking-Betriebssystem ist es möglich HANDLE als ein eigenständiges lauffähiges Programm in den Hauptspeicher des Rechners zu laden. Mit nur wenigen Unterprogrammen aus der Master-Slave-Bibliothek (siehe Bild 3.4.2) kann ein Benutzerprogramm mit der HANDLE-Task den Daten- und Komandotransfer abwickeln oder sich direkt in die Tabellenverwaltung von HANDLE einschalten (GERBER, 1985; GERBER, 1986).

Mit Unterprogrammroutinen aus der Master-Slave-Bibliothek wurde ebenfalls der standardisierte Slave MLH entwickelt. In ihm sind zeitaufwendige und speicherintensive Meßalgorithmen, die nicht nur bei psychophysikalischen Kontrastschwellenmessungen zum Einsatz kommen, realisiert. Benutzerprogramme können den MLH-Slave gleichzeitig mit dem HANDLE-Slave verwenden und erreichen so eine minimal adressierbare Speichergröße für das eigentliche Versuchssteuerprogramm. Der MLH-Algorithmus arbeitet nach einer Maximum-Likelihood-Methode, die optimale Schätzwerte eines Schwellenwertes aus den Antworten einer Versuchsperson ermittelt. Den entscheidenden Vorteil stellt

dabei die Möglichkeit dar, eine Fehlerschranke des geschätzten Schwellenwertes als Abbruchkriterium der Iterationen zu benutzen. Eine Beschreibung des Algorithmus erfolgt im Kapitel zu den Meßmethoden. Die Meßreihen zur Kontrastschwellenbestimmung beim Balkenexperiment und dem Experiment zu den elliptischen Gaborfunktionen setzen den MLH-Slave in dieser Form ein (siehe auch GERBER, 1986 und DERLICH, 1987).

Die beschriebenen Softwarewerkzeuge standardisieren den Aufbau und Ablauf von Versuchsprogrammen. Bild 3.4.3 verdeutlicht das Zusammenspiel von Hard- und Software mit der Versuchsperson. Der Zyklus Steuern-Reiz-Antwort wird im Normalfall so lange durchlaufen bis das Benutzerprogramm auf Grund einer voreingestellten Fehlerschranke ein Ergebnis ausgeben kann.

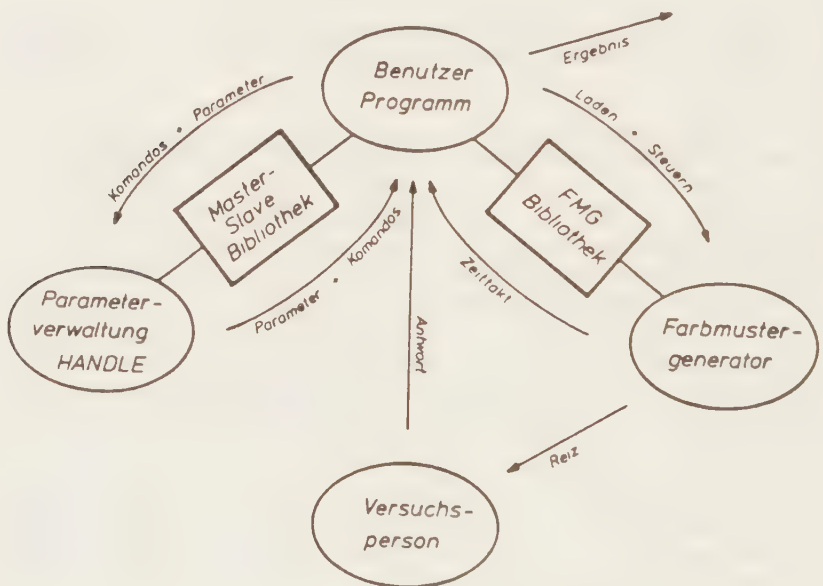


Bild 3.4.3: Zusammenspiel von Hard- und Software mit der Versuchsperson.

Der Anhang beschreibt an Hand eines schematischen PASCAL-Programms einige Beispiele zur Bilderzeugung und Bewegung mit dem Farbmuster-generator. Es hat sich gezeigt, daß nicht nur einfache Muster wie modulierte Gitter- und Gaborfunktionen möglich sind, sondern auch sehr komplexe Strukturen wie z.B. eine rotierende logarithmische Spirale zur Messung von Bewegungsnacheffekten (HESS, 1986).

Eine Reihe von Demonstrationsexperimenten aus der aktuellen Literatur der Psychophysik, programmiert mit den Software-Bibliotheken, unterstreicht die vielseitigen Möglichkeiten der Apparatur (siehe Anhang). Mehrere Praktikums- und Diplomarbeiten am Institut setzten den FMG erfolgreich ein (VEY, FELDHÜTTER, KRÄMER, HESS, DENK, KLINGER, DERLICH, JÜTTNER). Aber der experimentelle Aufbau wurde nicht nur zur Grundlagenforschung am visuellen System benutzt, sondern auch zur Früherkennung von Schäden an der Retina durch Diabetes Mellitus (PIWERNETZ, 1985a, 1985b). Das FMG-System ist also auch ein Prototyp für Anwendungen in der medizinischen Diagnose am visuellen System des Menschen.

Die große Anzahl von Experimenten und experimentellen Varianten, die in dieser Arbeit durchgeführt werden, zeigt auch, daß im Zuge der fortschreitenden der Standardisierung des Meßaufbaus und dessen Bedienung psychophysische Versuche ohne großen Zeitaufwand zu realisieren sind.

Als Erweiterung des Software-Angebots wäre eine eigenständige Programmiersprache denkbar, in der auf abstrakter Ebene komplexe Anweisungen gegeben werden können. Der Versuchsablauf ließe sich dann auf der Basis eines Interpreters oder Compilers durchführen. Vom Experimentator wird keinerlei Kenntnis der Standardprogrammiersprachen verlangt.

4. Meßmethoden

Die einzelnen Meßreihen benutzen drei verschiedene psychophysikalische Methoden zur Bestimmung von Schwellen einer Versuchsperson. Die Verfahren unterscheiden sich hauptsächlich im erforderlichen Aufwand und der erreichbaren Genauigkeit. Während Verschiebungsschwellen- und Reaktionszeitmessungen recht einfach durchzuführen sind, müssen bei der Bestimmung einer Kontrastschwelle geschickte Algorithmen die Kontrastauswahl der Reize treffen, damit sich reproduzierbare Datensätze erzeugen lassen.

4.1 Verschiebungsschwellenmessung

Als Verschiebungsschwelle bezeichnet man die kleinste spontane Verschiebung eines Objekts, die eine Versuchsperson erkennen kann. Sie beträgt für einen leuchtenden Punkt auf einem homogenen Hintergrundfeld je nach Versuchsperson ca. 0.018° – 0.036° (LEGGE, 1981). HADANI (1980) erreicht mit zufälligen Stereopunktmustern Schwellen von 0.002° – 0.003° und liegt so im Bereich der Vernier-Genauigkeit. Damit können Verschiebungsschwellen, die sich unterhalb des Niveaus der örtlichen Auflösung befinden, nicht vollständig einem örtlichen Analyseprozeß zugeordnet werden. Die Erkennbarkeit von Verschiebungsschwellen beruht also auch auf Eigenschaften des visuellen Systems, die Bewegungen zu erkennen und zu verarbeiten. Die Minimalschwellen lassen sich aber nur erreichen, wenn die Verschiebungsdauer im Intervall $[0.1, 1.0]$ Sekunden liegt (JOHNSON, 1976). Schwellen bei kürzeren oder längeren Bewegungszeiten sind durch feste Geschwindigkeiten bestimmt ($0.025^{\circ}/s$ oder $0.3^{\circ}/s$). Beschleunigungsvorgänge und einsetzende Objektbewegungen liefern eine weitere Erniedrigung der Verschiebungsschwellenwerte.

Verschiebungsschwellen zeigen im fovealen Bereich nur geringe Abhängigkeiten von der Leuchtdichte und der Länge der Testlinie (JOHNSON, 1980); in der Peripherie (18°) fallen die Werte mehr oder weniger stark ab. SCOBAY (1981) demonstriert in seinem Experiment eine dramatische Verbesserung der Schwellen bezüglich oszillierender Bewegungen, wenn die zeitlichen Integrationsmöglichkeiten für den Reiz mittels einer kurzen Verweildauer des Objekts am Ende einer Oszillation erweitert werden. Die Unterschiede zwischen fovealen und peripheren Schwellen erweisen sich als mehr quantitativ denn qualitativ (POST 1984). Weder LEGGE (1981) noch JOHNSON (1982) können eine Beeinflussung der Schwellen durch eine Bewegungsrichtung oder einen konstanten Geschwindigkeitsprozeß nachweisen. Sie betonen jedoch, daß sich die Verschiebungsschwellen durch Einführen von Referenzringen und -linien drastisch reduzieren. Damit läßt sich das durch unbewußte Augenbewegungen entstehende Rauschen weiter unterdrücken und so die Auflösung steigern.

Die Größe der Objektverschiebungen müssen natürlich innerhalb eines geeigneten Orts- und Zeitintervalls liegen. Die minimale Ortsverschiebung beträgt ca. $0.013''-0.017''$ bei einer minimalen Zeit von 0.1-0.2 Sekunden (COHEN, 1972). Zum Vergleich möge die Bewegung der Sonne am Himmel dienen. Sie beträgt nur $0.004''/s$ und kann somit nicht als Bewegung erkannt werden. Die Schwelle für das Erkennen einer reinen Ortsverschiebung liegt bei ca. $0.015''$ (ULLMAN, 1981).

4.2 Reaktionszeitmessung

Alle Vorgänge im menschlichen Gehirn sind an eine Verarbeitungszeit gekoppelt, so daß die Meßgröße Reaktionszeit in elementarer Verbindung zu den neuronalen Abläufen bei einer Versuchsperson stehen. Als Reaktionszeit definiert man das Zeitintervall zwischen dem Einschalten eines Reizes und dem Beginn einer verhaltensbedingten Reaktion. Reaktionszeitmessungen geben dem Experimentator ein direktes Maß für die zeitliche Abfolge der visuellen Prozesse und der antwortgebenden Entscheidungssysteme. Drei Faktoren spielen hierbei eine wichtige Rolle (EJIMA, 1987): Die Integrationszeit bei der Wahrnehmung, die Signalleitungszeit (Übertragungszeit) und die Verzögerungen im Antwortprozeß. Verzögerungen, die auf die Reaktionszeiten Einfluß nehmen, hängen außer von der Intensität des Signals oder seiner Energiecharakteristik auch von inneren Zuständen der Versuchsperson ab, z.B. Aufmerksamkeits-, Wahrnehmungs-, Gedanken- und Motivationszustand (PIERON, 1920). Die Erfahrungen einer VP im Umgang mit psychophysikalischen Experimenten beeinflussen ebenfalls nachhaltig die Ergebnisse. In der Literatur werden zur Beschreibung der Abhängigkeit der Reaktionszeit RZ von Reizdauer t und Reizintensität I zwei Funktionen favorisiert (TEICHNER, 1972):

$$RZ(I) = \frac{a}{I + b} + K \quad (3)$$

a, b : Konstanten
 I : Reizintensität
 K : nicht mehr reduzierbare RZ (neuronale Verzögerung)

oder

$$RZ(t) = \frac{t}{b \cdot t - a} \quad (4)$$

a : konstanter Wert bei dem RZ gegen unendlich steht ($t \rightarrow \infty$)
 b : Konstante für asymptotischen RZ ($t \rightarrow \infty$)-Wert,
 : abhängig von der Leuchtdichte
 t : Reizdauer

Für geringe Leuchtdichtewerte gilt in (4) $t \rightarrow \infty = -a/b$. Da die Reaktionszeiten bei konstanter Reizenergie ebenfalls konstant sind, läßt sich folgern, daß sie vom selben retinalen Prozeß abhängen wie die Empfindlichkeit.

In einem Modellansatz beschreibt STERNBERG (1969) eine hierarchisches System von einzelnen Verarbeitungsstufen, die ein Reiz sequentiell durchläuft, wobei jede Stufe ihre Aufgabe erst nach dem Ende der Bearbeitung durch die vorangegangene Stufe beginnt. Die Reaktionszeit ist demzufolge die Summe der Einzelprozesse, die sich aus den Stufen ergeben. Eine Zerlegung der Antwortzeit kann so Aufschluß über die Strukturen der beteiligten Prozesse geben.

BALL (1980) und TYNAN (1982) benutzen für ihr Modell der "konstanten Verschiebung" das additive Modell von oben:

$$RZ = \text{"Entscheidungszeit"} + \text{"verbleibende Ausführungszeit"}$$

Mit einer konstanten Verschiebung wird ein kritischer Objektverschiebungswert D bezeichnet, der zur Auslösung einer Reaktion bei einsetzender Objektbewegung ausreicht. Der Mittelwert der Reaktionszeiten erfüllt die Gleichung:

$$RZ = D / V + T_r \quad (5)$$

D : minimaler Verschiebungswert, der zur Erkennung
 : der beginnenden Objektbewegung ausreicht
 V : Objektgeschwindigkeit
 T_r : verbleibende Ausführungszeit der Reaktion

Die experimentellen Daten bestätigen jedoch (5) nur zum Teil. ALLIK (1984) schlägt deshalb eine geglättete lokale Dispersionsfunktion D vor, mit deren Hilfe die Reaktionszeitdaten zutreffender zu beschreiben sind. Die D -Funktion stellt ein Maß für die Erkennungswahrscheinlichkeit der Objektbewegung dar. Bild 4.2.1 zeigt für drei Geschwindigkeiten den Kurvenverlauf von $D(t)$.

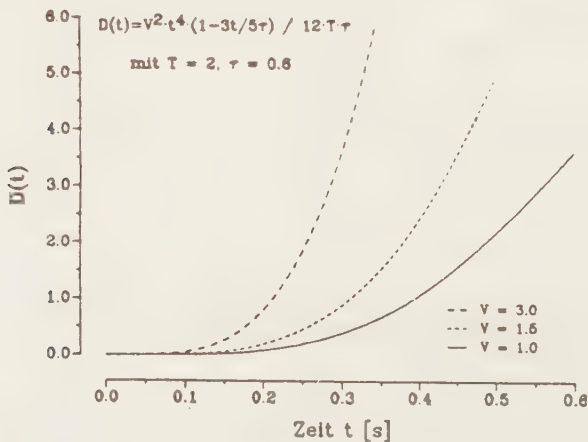


Bild 4.2.1: Lokale Dispersionsfunktion $D(t)$ nach ALLIK (1984).

Die Reaktionszeiten lassen sich jetzt durch die Wahl eines kritischen Wertes C modellieren. Die Zeiten, in denen C für die verschiedenen Geschwindigkeiten erreicht wird, unterscheiden sich von den entsprechenden Reaktionszeiten um die gleiche Konstante T_r , die demzufolge nichts anderes ist als die Differenz zwischen den Mittelwerten aller gemessenen und modellierten Reaktionszeiten.

Eine Verwendung der Reaktionszeitmessungen bei der Erkennung von Bewegungen erfordert sensorische Prozesse, die zeitlich integrierenden Mechanismen (Akumulatoren, Zähler) besitzen (TEICHNER, 1972). Alle Mechanismen beschreiben Reaktionszeiten als eine monotone inverse Funktion der Reizintensität. BALL (1980) fügt dem noch die Aussage hinzu: Reaktionszeiten auf einen Reiz sind umgekehrt proportional zur Empfindlichkeit des diesen Reiz detektierenden Mechanismus. Reaktionszeiten lassen sich also direkt mit Schwellenempfindlichkeiten in Verbindung bringen.

4.3 Kontrastschwellenmessung

Die am weitesten verbreitete Meßmethode in der Psychophysik ist die Bestimmung von Kontrastschwellenwerte einer Versuchsperson. Als Kontrast C wird dabei das Verhältnis der Leuchtdichte-Amplituden L_{max} und L_{min} zur mittleren Leuchtdichte nach

$$C := \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}} \quad (6)$$

bezeichnet (siehe auch z.B. SCHÖBER, 1954; BLAKEMORE, 1969). Es existieren eine Reihe von Algorithmen nach denen die Bestimmung der Kontrastschwellen innerhalb des experimentellen Ablaufs erfolgt. Die Auswahl des Verfahrens hängt in der Regel vom Aufwand ab, den der Experimentator zum Erreichen aussagekräftiger Resultate eingehen möchte. Darüber hinaus stellen die zum Erreichen eines stabilen Schwellenwertes nötigen Tests, sowie die Möglichkeit einen sinnvollen Fehler des Wertes zu definieren, die bestimmenden Größen bei der Algorithmenauswahl dar. Ein weiterer Einflußfaktor ist die Form der zugrunde gelegten psychometrischen Funktion mit dem Problem der Schätzung der freien Parameter aus den Meßdaten (EMERSON, 1984). Neben der einfachen Einstellmethode, bei der die Versuchsperson den Kontrast solange erhöht oder erniedrigt bis der Reiz sichtbar wird oder verschwindet, bauen die Experimentatoren in der Regel auf dem von CORNSWEET (1962) vorgeschlagenen Staircase-Verfahren ihre Varianten auf (VEY, 1984; PERIZONIUS, 1987).

Die Kontrastschwellenmessungen dieser Arbeit verwenden ein Verfahren, das nach einer Maximum-Likelihood-Methode die darzubietenden Kontrastwerte berechnet (TAYLOR, 1967; TAYLOR, 1983; HALL, 1981; PENTLAND, 1980). Nach PENTLAND (1980) berechnet sich der aktuell anzubietende Kontrast m_n aus dem Maximum des Produkts

$$m_0 = \max_{x \in (a,b)} \prod_{j=1}^{n-1} (1 + e^{-r_j \cdot (m_j - x)})^{-1} \quad (7)$$

Dabei ist eine psychometrische Funktion nach Gleichung (13) aus Kapitel 5.3.5 und der 50%-Punkt als Ziel der Schätzung vorausgesetzt. Die unabhängige Variable bewegt sich im Intervall (a,b) und r_j nimmt die Werte $+1$ für die Antwort "gesehen" und -1 für "nicht gesehen" an. Der Algorithmus schätzt also einen neuen Kontrastwert aus allen vorangegangenen Kontrasten und Antworten. Die Realisation von Gleichung (7) geschieht in einem Programm-Slave (MLH), der über die Master-Slave-Utility (siehe GERBER, 1986) an das Versuchsprogramm gekoppelt ist.

Das Auffinden des Maximums entspricht der Suche nach Nullstellen in der Ableitung. Die Ableitung eines Produkts ergibt wiederum eine einfache Summenbildung. Für eine computergerechtere Berechnung von (7) kann man somit auf die Maximumssuche über dem Produkt verzichten, wenn man x so wählt, daß die Summe aus den Produkttermen zu null wird. In einer zweiten Stufe schätzt das MLH-Programm noch den Steigungsparameter der psychometrischen Funktion, der in (7) durch r_j apriori auf ± 1 gesetzt wurde.

Der entscheidende Vorteil dieses Maximum-Likelihood-Verfahrens liegt in der Bestimmung der Fehler des geschätzten Kontrastwertes. Er kann in guter Näherung aus Monte-Carlo Simulationen zu

$$e = \frac{m_{i-1} - m_i}{m_i} \cdot \sqrt{i} \quad (8)$$

bestimmt werden (EMERSON, 1984). Hierbei steht i für die aktuelle Kontrastnummer. Die augenblickliche Schrittweite und die Zahl der Tests i sind für den Fehler ausschlaggebend. Damit läßt sich auf einfache Weise ein Abbruchkriterium für die Iterationen setzen und gleichzeitig einen konstanten Meßfehler erhalten, was bei allen anderen Meßverfahren nicht gegeben ist. Die Versuchsperson erreicht das Testende, wenn die Schwankungen der Schwellenkontraste (auf Grund der kleinen Schrittweite und der Zahl der durchgeführten Tests) einen festen Fehlerwert (z.B. 5%) unterschreiten. Die Versuchsprogramme verwalten für die gleichzeitige Bestimmung von Schwellen bei verschiedenen Parametern mehrere Maximum-Likelihood-Verfahren parallel, womit der VP jede Möglichkeit zur Testvorhersage genommen wird.

Eine Kontrastschwellenbestimmung setzt höhere Anforderungen an die Erkennungsleistung der Versuchsperson. Der Allgemeinzustand der Testperson beeinflußt das Arbeiten an der Schwelle der Erkennbarkeit nachhaltiger als zum Beispiel überschwellige Verschiebungswahrnehmungen oder einfache Reaktionszeitmessungen. Viele nicht immer steuerbare Größen, wirken auf eine Kontrastschwellenermittlung ein. Der Einfluß von Größe, Leuchtdichte und Struktur des Umfeldes tritt stärker in Wechselwirkung mit dem Schwellenreiz als bei einer klar überschwelligen Reizkonfiguration. Je nach Qualität des

Algorithmus fallen auch falsche Antworten der Versuchsperson ins Gewicht und liefern verschobene Schwellenwerte.

Eine Verbesserung des Antwortverhaltens der VP wird durch die Einführung von Reaktionszeitstreß erreicht. Man verlangt hierbei von der Versuchsperson ihre Antwort in einem, beschränkten Zeitintervall nach dem Reiz zu geben. Antworten, die außerhalb dieses Intervalls eintreffen, werden in der Auswertung nicht berücksichtigt. Die VP erhält über das IVI die Meldung, daß ihr Tastendruck nicht innerhalb der Zeitvorgaben liegt, und dieser Testdurchlauf ignoriert wird. Auf diese Weise werden die Antworten immer aus dem zeitlich gleichen Erregungszustand nach dem Reiz abgefragt. Zusätzlich bleibt der VP keine Bedenkzeit, in der sie über ihre Antwort entscheiden und ihr Bewertungskriterium von Testreiz zu Testreiz modifizieren kann

5. Experimente

Die Suche nach Invarianten im Eingangssignal sollte das Ziel einer jeden erfolgversprechenden Analyse der visuellen Sinneseindrücke sein. Mit dem Erkennen von invarianten Eigenschaften eines Objektes ist die weitere Verarbeitung der visuellen Welt einfacher und durch eine Reduktion der anfallenden Datenmengen deutlich schneller. Durch die Bildung von Invarianten ist es dem visuellen System außerdem möglich, wichtiges von unwichtigem zu trennen und eine Reduktion der Dimensionen des hochdimensionalen Merkmalraumes der Außenwelt effektiv durchzuführen. Der Zeitgewinn bei der Verarbeitung der Signale läßt sich im psychophysikalischen Experiment auch durch die Einführung von entsprechenden Vorinformationen erzielen. Bei der Wahrnehmung einer Objektbewegung könnte man als Invariante einen dem Objekt zugeordneten Bewegungsvektor vermuten. Die Erkennung von Objekten mit einem in Richtung und Betrag gleichen Vektor sollte dann erleichtert werden, falls die Zuordnung Objekt-Invariante bereits vollzogen wurde. Eine Übertragung der Objekt-Invarianten-Beziehung auf verschiedene Bildbereiche mit weiteren Objekten würde ebenfalls die Reaktion auf diese Objekte verbessern. Alle Experimente zielen darauf ab, die relevanten Größen bei einem Informationstransfer über größere Netzhautgebiete hinweg mit verschiedenen Meßmethoden einzukreisen und zu extrahieren. Den Vorgang der Erzeugung eines objektbezogenen Bewegungsmerkmals bezeichne ich im folgenden als (Bewegungs-) Induktion. Das dazugehörige Objekt heißt induzierendes Objekt.

Mit dem FMG-System ist es zum ersten Mal möglich, in psychophysikalischen Experimenten auf einfache Weise zwei und mehr Objekte unabhängig voneinander rechnergesteuert auf einem Monitor zu erzeugen und unter Echtzeitbedingungen zu bewegen. Ebenso können Reaktionszeiten auf Ereignisse auf dem FMG-Monitor mit einer Auflösung von einer Millisekunde über das intelligente Versuchsinterface (IVI) erfaßt werden.

5.1 Versuchspersonen

Psychophysikalische Experimente sprechen bei einer Versuchsperson (VP) eine Vielzahl von Detektor- und Verarbeitungsmechanismen auf unterschiedlichen neuronalen Ebenen an. Zwei prinzipielle Stufen lassen sich erkennen (Bild 5.1.1). Zum einen ein allgemeiner aktueller Gesamtzustand, der sich mit Entscheidungskriterien, Vorinformationen, Tagesform, Erfahrung, Erwartungshaltung oder Gedankenzustand umschreiben läßt, zum anderen eine indirektere und unbewußte Ebene, auf der die neuronalen Schwellenwerte, Mechanismen, Verarbeitungskanäle und -hierarchien liegen. Die Aufklärung der Arbeitsweise neuronaler Strukturen anhand von psychophysikalischen Meßergebnissen kann, wie in Bild 5.1.1 mit Pfeilen angedeutet ist, nur unter Berücksichtigung des

Gesamtzustandes der Versuchsperson geschehen. Meßmethode, experimenteller Aufbau und Auswertung der Ergebnisse müssen die Einflüsse der Versuchsparameter auf die direkte und indirekte Ebene beachten.

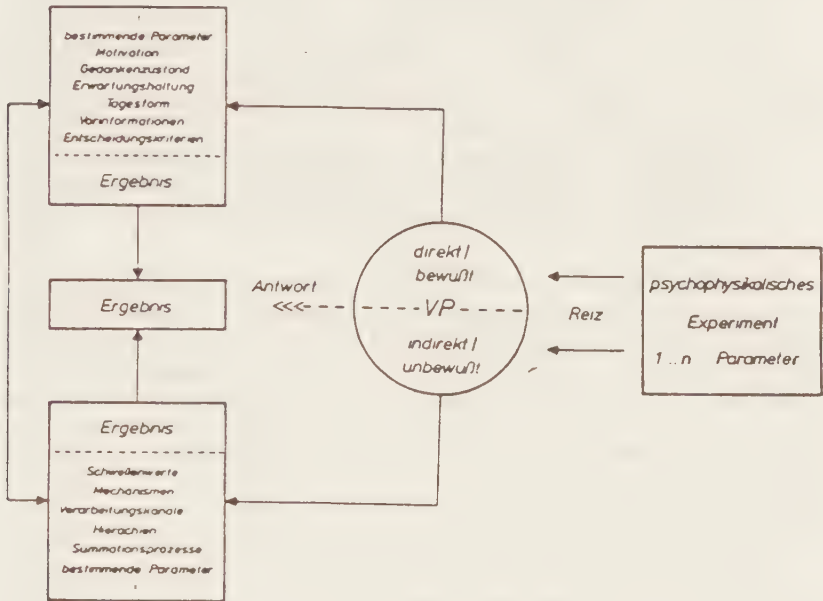


Bild 5.1.1: Zur Entstehung eines psychophysikalischen Meßergebnisses. Eine direkte und eine indirekte Ebene lassen ein Gesamtergebnis entstehen, wobei beide noch wechselseitigen Einfluß aufeinander nehmen.

Die mögliche gegenseitige Beeinflussung beider Ergebnissphären ist stark an die Zeit gekoppelt und kann in der Regel während des Experiments als konstant angesehen werden (Ausnahme: Lernprozesse).

An den einzelnen Experimenten beteiligen sich bis zu 6 Versuchspersonen (CS, ES, GM, HD, KG, TS). CS und GM sind mit psychophysikalischen Meßmethoden und Experimenten relativ unerfahren. Tabelle 5.1.1 faßt die wichtigsten Daten der Versuchspersonen zusammen:

VP	Geschlecht	Alter [a]	Korrektur [dpt]	Erfahrung [%]
CS	weiblich	23	-	0
ES	weiblich	28	-1.25	150
GM	männlich	28	-	10
HD	männlich	27	-	30
KG	männlich	29	-2.75	100
TS	männlich	26	-2.50	120

Tabelle 5.1.1: Tabelle der Versuchsperson. Für Brillenträger ist die Größe der Korrektur angegeben. Die Erfahrung in psychophysikalischen Experimenten ist in Prozent bezüglich der VP KG ausgedrückt. KG besitzt über 100 Stunden Meßerfahrung.

Alle Experimente werden monokular und mit dem dominanten Auge unter photopischen Beleuchtungsbedingungen durchgeführt. Der Beobachtungsabstand vom Fernsehmonitor beträgt in der Regel 4 Meter. Das Umfeld bildet die Rückwand des Meßraumes und wird mittels einer dimmbaren Tageslichtleuchtstoffröhre auf subjektiv gleiche Helligkeit zum Monitor eingestellt. Zusätzlich muß die VP zur Verbesserung ihrer Fixationsgüte in einigen Experimenten ihren Kopf mit einer Beißstütze arretieren, die bei der Registrierung von Augenbewegungen ebenfalls unerläßlich ist.

5.2 Verschiebungsschwellenmessung

Es werden die Wechselwirkungen zwischen lokalen Bewegungsreizen untersucht. Der Abstand der Reize beträgt dabei ein Vielfaches ihrer lokalen Ausdehnung. Die Ergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Strukturen sowie die vermittelnden Parameter eines Bewegungsinformationstransfers zu.

Da mögliche Effekte bisher auch in der Literatur noch nicht bekannt sind, erfolgt eine detaillierte Diskussion der Meßreihen und ihrer Auswertung.

Die grundlegende Frage nach irgendeinem Einfluß einer Objektbewegung auf ein zweites örtlich getrenntes Objekt testet das Verschiebungsschwellenexperiment. Eine örtlich und zeitlich begrenzte Objektverschiebung mit einer definierten Geschwindigkeit dient als Induktionsreiz. Als Meßmethode findet eine Verschiebungsschwellenmessung Verwendung, da sie das am einfachsten und schnellsten realisierbare Verfahren ist. Es wird die Schwelle für das zweite Objekt in Abhängigkeit von den möglichen Bewegungsrichtungen beider Objekte, dem örtlichen und zeitlichen Abstand der Objekte und ihrer Geschwindigkeit untersucht. Kontrollmessungen ohne induzierende Objektbewegungen dienen als Vergleichsdaten.

Die Versuchsperson antwortet mit ja (Bewegung des Testobjekts gesehen) oder mit nein (Bewegung nicht gesehen). Die Verschiebung des Testobjekts erfolgte in den durch den Farbmustergenerator gegebenen minimalen Zeittaktschritten von 20ms. Alle 20ms verschiebt sich das Objekt um 2 Pixel auf dem

Monitor. Die vom Testobjekt zurückgelegten Wegstrecken waren: 2, 4, ..., 12, 14 Pixel. Entsprechend einer Distanz in Grad Sehwinkel von 0.03, 0.06, ..., 0.18, 0.21. Die dazugehörigen Bewegungszeiten gehen von 20ms - 280ms. Die Objekte waren als Kreuze ausgebildet mit einer Ausdehnung von 0.25° Sehwinkel. Die Versuchsperson beobachtet den Monitor (Feldgröße $4.6^\circ \times 3.5^\circ$) aus einer Entfernung von 4m und wurde durch eine Beißstütze an unerwünschten Kopfbewegungen gehindert. Kopfbewegungen während des Versuchs erschweren es unter anderem der Versuchsperson, den symmetrisch zwischen den Objekten eingeblendeten schwarzen Fixpunkt (0.05° Sehwinkel) mit ausreichender Genauigkeit und Konstanz zu fixieren. Auch ein Einfluß auf die Ergebnisse durch bestimmte Augenbewegungen kann nicht ausgeschlossen werden (siehe dazu Kapitel 6.3).

Bild 5.2.1 zeigt die Versuchsanordnung und die wesentlichen Parametergrößen:

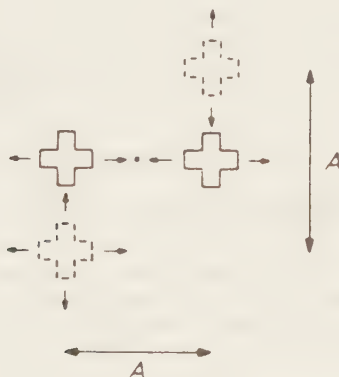


Bild 5.2.1: Versuchsanordnung beim Experiment mit Verschiebungsschwellen; Pfeile symbolisieren die möglichen Bewegungsrichtungen.

Übersicht über alle Parameter:

Feldgröße	: $4.6^\circ \times 3.5^\circ$
Objektgröße	: 0.25°
Abstand A der Objekt	: $1.4^\circ, 2.8^\circ$
Geschwindigkeiten	: $0.7^\circ/\text{s} \dots 3.0^\circ/\text{s}$
Bewegungsstrecke	: 0.03, 0.06, ..., 0.21
Bewegungsdauer	: 20...280ms
Kontrast zum Hintergrund	: 40%
Hintergrundleuchtdichte	: 12.5 cd/m^2
Objektfarbe	: weiß

Die Darbietung der Objekte erfolgte überschwellig mit einem Kontrast von 40% zum Umfeld. Ein Meßverfahren, das auf überschwelligen Reizen basiert, hat gegenüber Experimenten mit Schwellenkriterium immer deutlich Vorteile bezüglich der Genauigkeit und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Oft ist

es schwierig das Schwellenkriterium über längere Meßzeiträume stabil zu halten. In einer natürlichen Umgebung sind Schwellenentscheidungen nicht die Regel. Normalerweise stellen sich visuelle Erkennungsaufgaben im überschwelligen Kontrastbereich (Bewegungen, Formen, Farben).

Die Objektfarbe war weiß, der Hintergrund grau mit einer Leuchtdichte von ca. 12.5 cd/m². Die Pfeile im Bild 5.2.1 symbolisieren die möglichen Bewegungsrichtungen der Objekte. Bei einigen Kontroll- und Vorversuchen wurde nur ein Testobjekt benutzt. Die gestrichelten Objekte in Bild 5.2.1 zeigen eine alternative experimentelle Anordnung, bei der die Objekte auf der Diagonalen durch den Fixationspunkt liegen. Der physikalische Objektabstand vergrößert sich hier um den Faktor $\sqrt{2}$.

5.3 Versuchsablauf, Versuchsdurchführung

Jeder Einzeltest wird mit einem 400ms langen Ton eingeleitet. Danach werden die Objekte an ihren Ausgangspositionen eingeblendet (t_a im Bild 5.3.1). Der Startzeitpunkt der Bewegungen ist rechnergesteuert zufällig im Zeitintervall [1,2] Sekunden (t_{ia} im Bild 5.3.1). Der Startzeitpunkt der Testbewegung t_{ia} ist durch Formel

$$t_{ia} = \frac{A}{V_1} + t_{ia} + t_a \quad (9)$$

A : Abstand der beiden Objekte
 V_1 : Bewegungsgeschwindigkeit des induzierenden Objekts
 t_{ia} , t_a : siehe Bild 5.3.1

gegeben. Die Bewegung des Testobjekt setzt also genau zu dem Zeitpunkt ein ($t_a - t_{ia}$), zu dem das Induzierende Objekt bei konstanter Geschwindigkeit den Ort des Testobjektes erreichen würde. (siehe die gestrichelte Linie in Bild 5.3.1). Dies gilt unabhängig von den Bewegungsrichtungen.

Nach dem Ende der Testbewegung (Zeitpunkt t_{ea} , $n=1..16$), kann die VP durch Drücken der Taste "Bewegung gesehen" oder "Bewegung nicht gesehen" auf dem intelligenten Versuchsinterface (IVI) ihre Antwort dem Versuchsprogramm mitteilen. Mit einem weiteren Ton der Länge 200ms wird der VP signalisiert, daß der Testdurchgang beendet ist, und die Antwort angenommen wurde. Nach einer Totzeit von ca. 1 Sekunde erfolgt dann das nächste Testintervall. Bei der Erstellung der Parameterkombinationen wurde darauf geachtet, daß die maximale Dauer einer experimentellen Sitzung 50 Minuten nicht überschreitet. Die Zuverlässigkeit der gegebenen Antworten bei längeren Sitzungen geht spätestens nach dieser Zeit deutlich zurück. Die steigende Zahl "gesehener" Blanks weist dann darauf hin (siehe Kapitel Vorversuche).

Die Geschwindigkeiten der Objekte waren im Verschiebungsschwellenexperiment immer identisch, so daß die Steigungen der Bewegungsgeraden im Bild 5.3.1 für induzierendes Objekt und Testobjekt gleich sind.

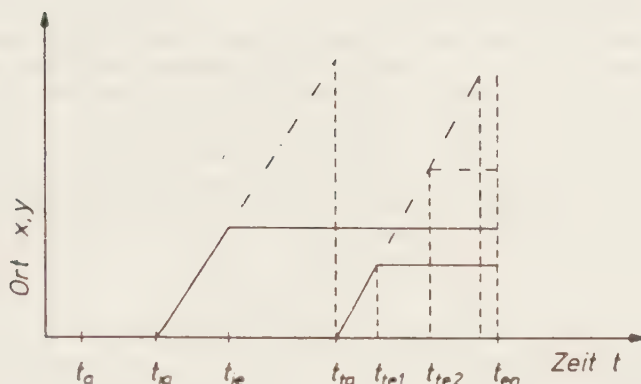


Bild 5.3.1: Ort- Zeitdiagramm des Verschiebungsschwellenexperiments

Startzeitpunkt Testdurchgang : t_a
 Start induzierende Bewegung : t_{ia}
 Ende induzierende Bewegung : t_{ie}
 Start Testbewegung : t_{ta}
 Ende Testbewegung : t_{en} , $n=1..16$
 Ende Test : t_e
 Objekt Ort- Zeitabstand : $t_{ta} - t_{ia}$
 Vorlaufzeit, zufällig : $(t_{ia} - t_a) \in [1,2]s$
 Maximale Dauer einer experimentellen Sitzung, ca. 50 min

Die experimentellen Parameter und der Versuchsablauf sind in allen Experimenten dieser Form entsprechend. Auf Abweichungen wird bei der Beschreibung der einzelnen Versuche speziell hingewiesen.

5.3.1 Vorversuche, Ergebnisse, Diskussion

Mit analogen Versuchsanordnungen wie oben beschrieben werden in verschiedenen Vorexperimenten die wichtigsten Parameter abgeschätzt. So zeigte sich, daß für jede Verschiebung gleicher Größe die Anzahl der nötigen Tests auf 50 beschränkt bleiben kann. Zum einem läßt sich so die zur Identifizierung von Effekten wichtige Genauigkeit der Resultate erreichen, zum anderen aber kann eine unnütze Belastung und die damit verbundene Reduzierung der Aufmerksamkeit einer VP in Grenzen gehalten werden. Die absoluten Fehler der Meßwerte betragen ca. $\pm 5\%$. Die einzelnen Verschiebungsdistanzen werden im Experiment zufällig dargeboten, so daß die VP keine Voraussage für den aktuellen Testwert aus den vorangegangenen Tests ableiten kann. Unter die einzelnen Tests werden zusätzlich noch sogenannte Blanktests gemischt. Hierbei findet zwar eine induzierende Objektbewegung statt, aber es erfolgt keine Testbewegung. Der Blanktestanteil an der Gesamtzahl der Tests bewegte sich ungefähr zwischen 20 und 25 Prozent, je nach der Zahl der zu erwartenden "gesehen / nicht gesehen" - Antworten. So verteilen sich die von

der VP in jedem Experiment zu gebenden Antworten etwa gleich auf die beiden Antworttasten. In Versuchen mit den Kontrollbedingungen, bei denen keine induzierende Bewegung stattfindet, wurde ebenfalls über Blanktests ein Gleichgewicht zwischen Antworten "gesehen" und "nicht gesehen" erzeugt. Dadurch wird die Eintönigkeit vermieden, die bei ständig gleichlautenden Antworten entsteht. Bei immer gleichen Antworten besteht außerdem die Gefahr, daß die VP glaubt einmal eine andere Antwort geben zu müssen. Das bedeutet aber eine Verschiebung oder Veränderung des Entscheidungskriteriums. Innerhalb eines psychophysikalischen Experiments sollte aber immer ein stabiles Entscheidungskriterium bei der Versuchsperson erzeugt werden.

Die Vorversuche zeigten auch, daß eine Bewegungsdistanz von 14 Pixeln auf dem Monitor, entsprechend 0.2° Sehwinkel, für eine 100%ige Erkennungswahrscheinlichkeit ausreicht. Auch der Ort des induzierenden Objekts kann im Experiment zufällig zwischen linker oder rechter Gesichtsfeldhälfte, entsprechend links oder rechts vom Testobjekt, variieren, ohne daß sich signifikante Einflüsse bemerkbar machen.

Bild 5.3.2 zeigt die Meßresultate eines Vorversuchs zur Bewegungsstrecke und Geschwindigkeit. Es wird mit nur einem Objekt rechts vom Fixationspunkt gemessen. Aufgetragen sind auf der x-Achse die Verschiebung des Testobjekts in Pixeleinheiten des Monitors, auf der y-Achse die Anzahl der Antworten "gesehen" in Prozent. Der Parameter Geschwindigkeit des Testobjekts variiert von 1,..., 4 Pixeln/20ms, entsprechend 0.7,...3.0 Grad pro Sekunde. Die Größe der Symbole entspricht den Fehlern einer einzelnen Messung. Bild 5.3.2a) und b) enthalten die Daten für die Bewegungen nach links und rechts, Bild 5.3.2c) zeigt die Mittelwerte über alle Geschwindigkeiten getrennt nach den jeweiligen Bewegungsrichtungen.

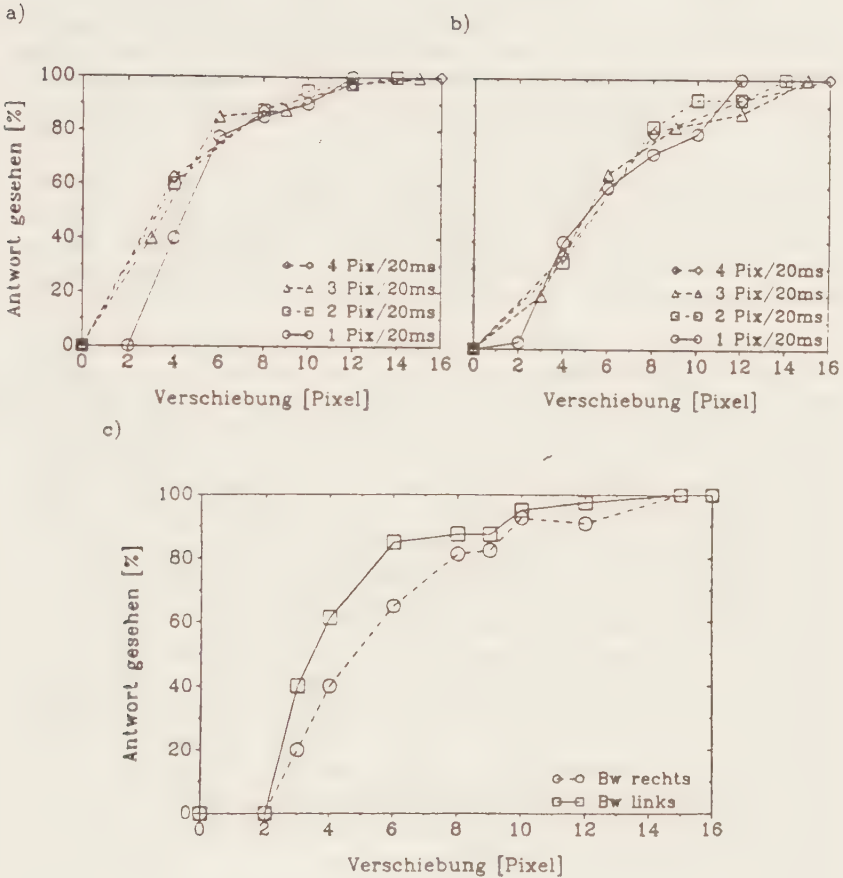


Bild 5.3.2: Verschiebungsschwellenmessung mit Objektbewegungsgeschwindigkeit als Parameter. Ein Objekt im Gesichtsfeld. Objekt 1.4° rechts vom Fixationspunkt. VP = ES
 a) Bewegung nach links
 b) Bewegung nach rechts
 c) Mittel über alle Geschwindigkeiten

Für Verschiebungsgeschwindigkeiten, die größer als ein Pixel pro 20ms sind, zeigt dieser Vorversuch keine signifikanten Unterschiede bei den Verschiebungsschwellen. Bei der langsamsten Geschwindigkeit (1 Pixel/20ms) sind die Schwellenwerte deutlich herabgesetzt, insbesondere dann, wenn eine Objektbewegung nach links stattfand (durchgezogene Linie in Bild 5.3.2a). Diese Unterschiede zu den restlichen getesteten Geschwindigkeiten liegen nur im

unteren Bereich der Verschiebungen. Das entscheidende Merkmal zur Erkennung einer Bewegung ist in diesem Experiment also zum einen die Größe und zum anderen die Richtung einer Verschiebung und nicht deren Geschwindigkeit. Auf Grund dieser Geschwindigkeitsunabhängigkeit wurden alle weiteren Experimente mit Verschiebungsschwellenmessungen mit einer Geschwindigkeit 2 Pixel/20ms, also 0.7°/s, durchgeführt.

In Bild 5.3.2 c) wird über die Geschwindigkeiten 2, 3, und 4 Pixel/20ms gemittelt. Nun treten deutlich Unterschiede in den Schwellen für die Bewegungsrichtungen "rechts" und "links" auf. Die Kurve für Bewegungen des Objekts nach rechts (Kreissymbole) liegt immer unter der für Bewegungen nach links (Quadratsymbole).

Der Einfluß der retinalen Inhomogenität macht sich hier vermutlich bemerkbar. Die Dichte der Zapfenrezeptoren nimmt vom Zentrum des schärfsten Sehens, der Foveola, nach außen hin stark ab, nämlich von ca. 150000 pro mm^2 auf ca. 20000 pro mm^2 bei einer Exzentrizität von 5°. Im Versuch wurden Schwellen eines Objekts gemessen, das ca. 1.4° außerhalb der Sehachse liegt, und somit auch außerhalb der Fovea, dem zentralen Bereich der Retina mit homogener Zapfenverteilung. Für Objekte, die im rechten Sehhalbraum liegen, und sich zur Sehachse hin bewegen (also nach links) gilt, daß sich ihr retinales Abbild auch zur Sehachse bewegt (mit der Bewegungsrichtung "rechts" (siehe Bild 5.3.3)). Die Bewegung in Richtung der Sehachse ist aber mit einem Anstieg der Dichte und einer Verringerung des Durchmessers bzw. einer Vergrößerung des Abstandes der Zapfenrezeptoren verbunden. Eine Verkleinerung des Detektorrasters hat zur Folge, daß auch kleinere Objektverschiebungen wahrgenommen werden können. So sollten Bewegungen eines Objekts im rechten Halbraum nach links immer kleinere Schwellen aufweisen als Bewegungen nach rechts. Objektausdehnungen, die sich über viele Zapfen erstrecken, sollten diesen Effekt noch verstärken, da dann die Differenz in den Rezeptordichten zwischen Objektanfang- und ende besonders groß ist. Analoge Überlegungen gelten für Objekte im rechten Halbraum.

Die Erkennung einer kleinen Objektverschiebung geht sicher auf einer hohen Verarbeitungsstufe vonstatten, die das Objekt in einer Koordinatenposition beschreiben kann. Auf Rezeptorebene läßt sich keine objektgebundene Bewegung registrieren, da die Reaktionen auf das Ein- und Ausschalten von Reizen unterschiedliche Zeitcharakteristiken besitzen. Das Einschalten eines Reizes kann immer schneller erkannt werden.

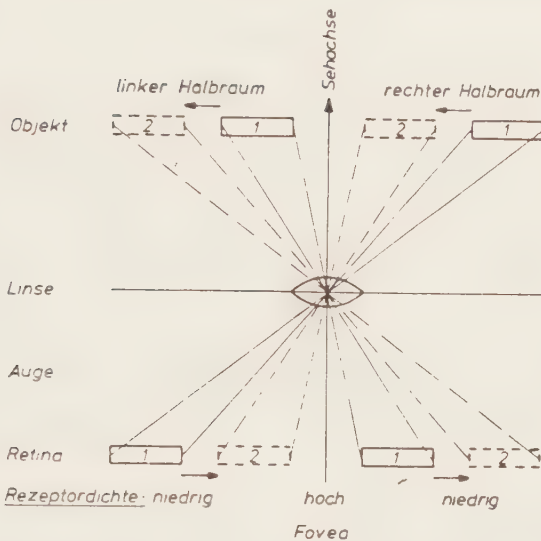


Bild 5.3.3: Schematische Darstellung von bewegten Objekten auf dem Rezeptorraster der Retina. Bewegungsrichtungen bezüglich der Sehachse sind für Aussenraum und Retinabild gleich. Die Ziffern 1 und 2 markieren jeweils Anfang und Ende der Objektbewegung.

5.3.2 Kontroll- und Nullmessungen

Im Gegensatz zu den Vorversuchen mit nur einem Objekt im Gesichtsfeld, werden der Versuchsperson bei den Kontrollmessungen zwei Objekte präsentiert, je eines links und rechts von der Fixationsmarke. Der VP wurde nur mitgeteilt, daß sich bei jedem Testdurchgang eines der beiden Objekte bewegt, oder aber überhaupt keine Bewegung stattfindet. Damit war der VP die Möglichkeit genommen, bei Unsicherheit über den Testverlauf einfach "ja, gesehen" einzugeben. Ohne Blanktestdurchgänge entspricht sonst die Antwort "ja, gesehen" immer dem korrekten physikalischen Sachverhalt. Mit der Einführung von Blanktests läßt sich die wichtige Stabilisierung des Entscheidungskriteriums der VP erreichen. Die Auswahl der Bedingungen (Bewegung rechts/links, keine Bewegung) erfolgte zufällig. Die Mischung von Ablaufvarianten zielte auch darauf ab, die im Vorexperiment beobachteten rechts/links Differenzen zu verringern.

5.3.2.1 Ergebnisse

In Bild 5.3.4 sind die Ergebnisse nach Objekten und Bewegungsrichtungen getrennt für zwei Versuchspersonen zusammengefaßt.

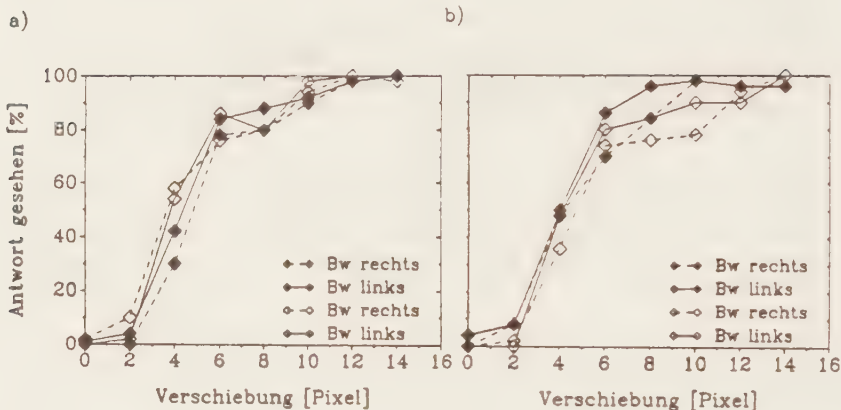


Bild 5.3.4: Meßergebnisse des Kontrollversuchs beim Verschiebungsschwellenexperiment. x-Achse: Verschiebung in Pixel auf dem Monitor. y-Achse: Antwort "gesehen" in Prozent. Bw rechts/links= Bewegung nach recht links.

Objekt Ort- Zeitabstand: 2.8°, 960ms

Offene Symbole : Objekt im rechten Halbraum

Geschlossene Symbole : Objekt im linken Halbraum

a) VP = ES

b) VP = KG

Auch diese Meßkurven (Bild 5.3.4) zeigen den S-förmigen Verlauf, der für alle Verschiebungsschwellenexperimente typisch ist. Auffallend ist, daß die Schwellen des rechten Objekts (geschlossene Symbole) im Verschiebungsintervall [2.4] in Bild a) immer unterhalb der des Objekts im linken Halbraum liegen. Die Ursache dieser Bevorzugung des linken Objekts ist vermutlich in der Versuchsperson selbst zu suchen, da, wie Bild 5.3.4 b) zeigt, bei der VP KG kaum Unterschiede im Verschiebungsbereich [2.4] zwischen linkem und rechtem Objekt zu erkennen sind. Es mag sein, daß die VP ES ihre Erwartungshaltung trotz der gegebenen Anweisungen nicht gleichberechtigt auf beide Objekte verteilte, und das linke Objekt eine Schwellenerniedrigung erfahren hat. Wie bereits bei den Vorversuchen zeigen sich, wenn auch nicht so ausgeprägt, die Unterschiede in den Bewegungsrichtungen der Objekte. Die Verschiebung des Objekts im rechten Gesichtsfeld nach rechts ist für die VP leichter zu erkennen als die Verschiebung nach links. Andeutungsweise ist dies in analoger Form auch zu sehen, wenn das Objekt des linken Halbraums den Testreiz (offene Symbole) auslöste. Diese Tendenz ist bei beiden Versuchspersonen zu erkennen. Alle Kurven erreichen die 50% Schwelle bei einer Verschiebung von ca. 4.0-5.0 Pixeln entsprechend 0.06-0.07 Grad Sehwinkel. Setzt man die Wahrnehmungsschwelle zu 75% gesehener Darbietungen an, so sind ca. 5.3-6.3 Pixel Verschiebung, entsprechend 0.08-0.09 Grad, nötig. Die Schwankungen

der einzelnen Werte im Verschiebungsintervall [6,10] sind bei KG größer als bei ES.

5.3.2.2 Blinkmessung

Eine Messung mit einem aufblinkenden Objekt und einem Testobjekt, dessen Bewegung erkannt werden mußte, dient als weiteres Kontrollexperiment. Zum Zeitpunkt t_{1a} (Bild 5.3.1) wird das induzierende Objekt von 0 auf 40% Kontrast gesetzt, so daß dann zwei Objekte auf dem Monitor sichtbar sind. Am Ende eines Testdurchgangs blendet das Versuchsprogramm alle Objekte aus, und nur die Fixationsmarke ist auf dem Bildschirm zu sehen.

Es werden die Verschiebungsschwellen des Testobjekts in Abhängigkeit von den Objektabständen und Bewegungsrichtungen bestimmt. Der Versuchsablauf entspricht einer Messung mit einem induzierendem Objekt, das jedoch zum Startzeitpunkt der induzierenden Bewegung nur auf dem Monitor erscheint, also keine Bewegungsinformation besitzt. In Bild 5.3.5 sind für Objektabstände von 32 bis 192 Pixeln die Antworten "gesehen" in Prozent über den Pixelverschiebungswerten aufgetragen. Bild 5.3.5a) zeigt die Daten für eine Testobjektbewegung nach links, Bild 5.3.5b) die für eine Bewegung nach rechts. Bild 5.3.5c) und Bild 5.3.5d) beinhalten die Kurven für Bewegungen nach oben oder unten. In allen Bildern ist im Mittel ein nahezu linearer Anstieg der Antworten "gesehen" im Bereich von 2 bis 6 Pixeln Verschiebung zu beobachten, und die Kurve für den Abstandswert 32 (durchgezogene Linie) ist mit Ausnahme der Bewegung nach oben zwischen 0 und 4 die obere Einhüllende der gesamten Kurvenschar. Andeutungsweise kann man als untere Einhüllende die Kurve des Parameters 192 bezeichnen (Ausnahme: Bewegung nach unten). Das bedeutet, daß die VP beim Objektabstand 32 die beste Verschiebungserkennung und bei 192 die Schlechteste besitzt. Aus den restlichen Parameterkurven lassen sich bei dieser Darstellungsform kaum relevante Aussagen gewinnen. Die zum Teil doch recht verschiedenen Kurvenformen lassen auf große Unterschiede im Erkennen der Bewegungsrichtungen schließen. Dies deutet nicht unbedingt auf verschiedene retinale oder kortikale Verarbeitungsmechanismen hin, sondern ist vermutlich in der Versuchsanordnung aus blinkendem Objekt und Testobjekt begründet.

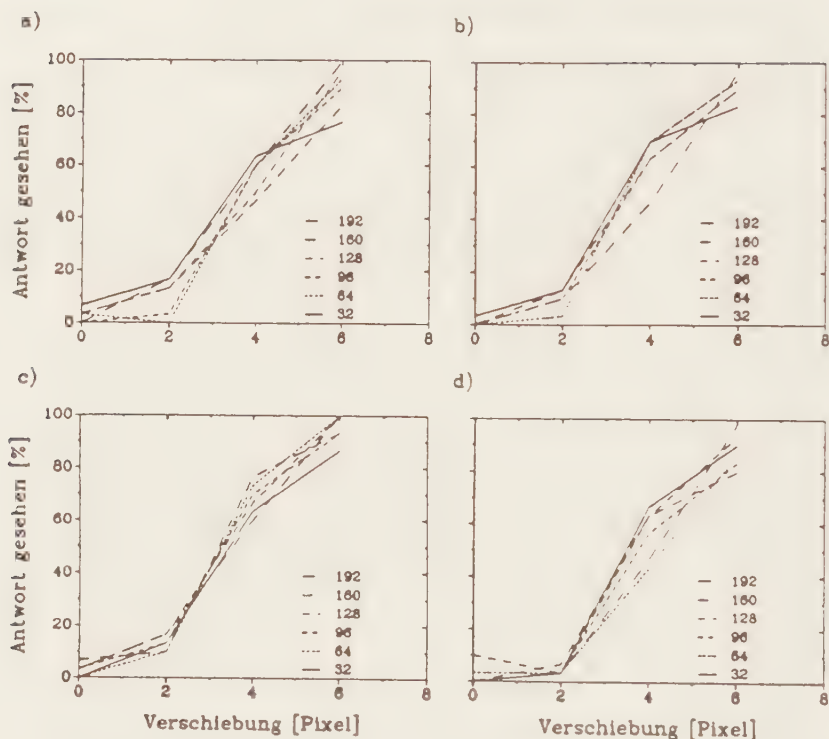


Bild 5.3.5: Kontrollexperiment Blinkmessung. y-Achse: Antwort "gesehen" in Prozent. x-Achse: Verschiebung in Pixel des Testobjekts. Parameter (in Pixel): Abstand blinkendes Objekt Testobjekt.

- a) Testobjektbewegung nach links
- b) Testobjektbewegung nach rechts
- c) Testobjektbewegung nach oben
- d) Testobjektbewegung nach unten

Die Abhängigkeit der Verschiebungen von den Bewegungsrichtungen des Testobjekts demonstriert Bild 5.3.6. Die Kurven für einen Objektabstand von 64 Pixeln spalten sich in der Reihenfolge der Erkennbarkeit nach den Richtungen oben, rechts, links und unten auf. Die Auftrennung ist, wenn auch nicht immer in dieser Deutlichkeit, in allen anderen Messungen festzustellen. Bewegungen nach oben sind also hier am Besten zu erkennen und Bewegungen nach unten benötigen die größte Verschiebung, um erkannt zu werden.

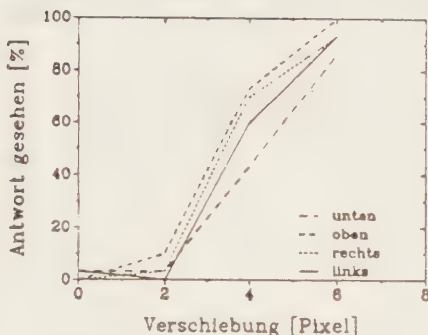


Bild 5.3.6: Kontrollexperiment Blinkmessung. Antworten "gesehen" in [%] über Verschiebung [Pixel]. Objektabstand 64 Pixel. Aufspaltung der Bewegungsrichtungen.

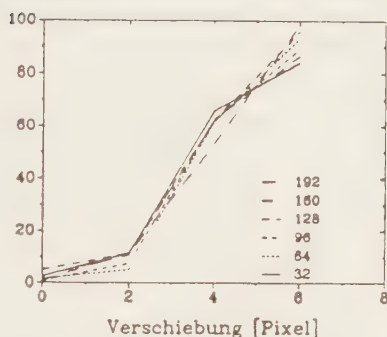


Bild 5.3.7: Kontrollexperiment Blinkmessung. Antworten "gesehen" [%] über Verschiebung [Pixel]. Parameter: Abstand blinkendes Objekt- Testobjekt. Mittelung über alle Bewegungsrichtungen.

Berücksichtigt man die Aufspaltung in die einzelnen Richtungen nicht und bildet das arithmetische Mittel der Meßdaten, so entstehen die Kurven von Bild 5.3.7. Daraus läßt sich im wesentlichen schon die getroffene Aussage ableiten: Bewegungen mit dem Abstand 32 können am leichtesten erkannt werden, Bewegungen mit Abstand 192 sind von allen am schlechtesten wahrnehmbar.

5.3.2.3 Diskussion

JOHNSON (1980) zeigte, daß bei der Messung von Verschiebungsschwellen bis zu einer Bewegungszeit von ca. 500ms keine Abhängigkeit der Schwellen von der Reizdauer erkennbar ist. Im Experiment auftretende Effekte sind also nicht auf unterschiedliche Bewegungszeiten (20 - 280ms) zurückzuführen.

Der Einfluß eines weiteren Objekts im Gesichtsfeld untersuchte JOHNSON (1982). In seinem Experiment wurden die Verschiebungsschwellen bei Anwesenheit einer Referenzlinie stark reduziert. Auch hier konnte er keine Abhängigkeit bei Bewegungszeiten < 500ms des Testobjekts nachweisen. Die Kontrollmessung mit einem und mit zwei Objekten lassen sich also nicht ohne weiteres vergleichen.

Da in erster Linie der Einfluß einer induzierenden Objektbewegung auf das Testobjekt interessiert, sind mögliche Effekte, die auf den Eigenschaften Objekt rechts/links oder Bewegung rechts/links basieren, vernachlässigt worden.

Die beiden Kurven in Bild 5.3.8 sind aus dem arithmetischen Mittel der Kontrollmessung für die zwei Versuchspersonen errechnet. Beide Kurven sind nahezu identisch und zeigen, daß mit diesem Versuchsaufbau und Ablauf stabile Resultate erzielbar sind.

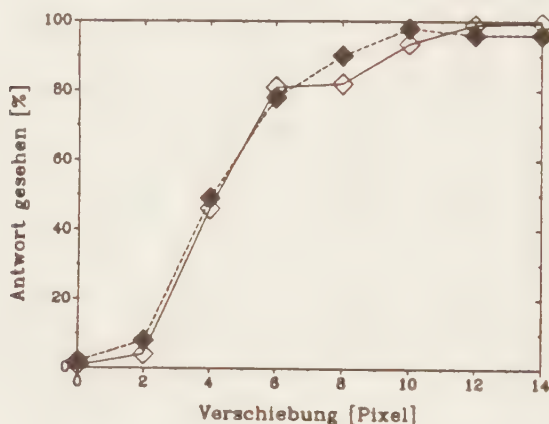


Bild 5.3.8: Verschiebungsschwellen beim Kontrollexperiment. Mittelwerte aus Bild 5.3.4a) und b). offene Symbole: VP = ES, geschlossene Symbole: VP = KG.

5.3.3 Induktionsmessung

In diesem Versuch mußte die VP die mögliche Bewegung des zweiten Objekts erkennen und entsprechend mit "ja gesehen" oder "nein nicht gesehen" antworten. Dabei konnte sich das Testobjekt wechselweise von Test zu Test im rechten oder linken Halbraum befinden. Die VP wird so instruiert, daß für sie nur die Erkennung des Bewegungszustandes des Objektes relevant ist, das sich nach der Bewegung des induzierenden Objekts bewegen kann. Es wird also nur die Reaktion auf den Beginn der zweiten Objektbewegung während eines Testdurchlaufs verlangt. Die Versuchsperson kann also keine Angabe darüber machen, welches der beiden Objekte die Induktion auslösen wird. Der Ort des induzierenden Objekts ist dadurch unbekannt. Im Falle eines Blanktests darf die VP keine Reaktionszeittaste bedienen. Die induzierende Bewegungsstrecke ist überschwellig und auf 14 Pixel, entsprechend 0.21° Sehwinkel, festgelegt. Die dazugehörige Geschwindigkeit betrug in allen Verschiebungsexperimenten 2 Pixel pro 20ms ($1.5^\circ/\text{s}$).

In den Diagrammen von Bild 5.3.9 sind die Meßergebnisse von Versuchsreihen mit induzierender Bewegung für zwei verschiedene Versuchspersonen zusammengefaßt. Die Teilbilder sind nach zwei Bewegungs-

richtungen des Testobjekts (links rechts) und zwei Objektabständen (96/192 Pixels) aufgespalten.

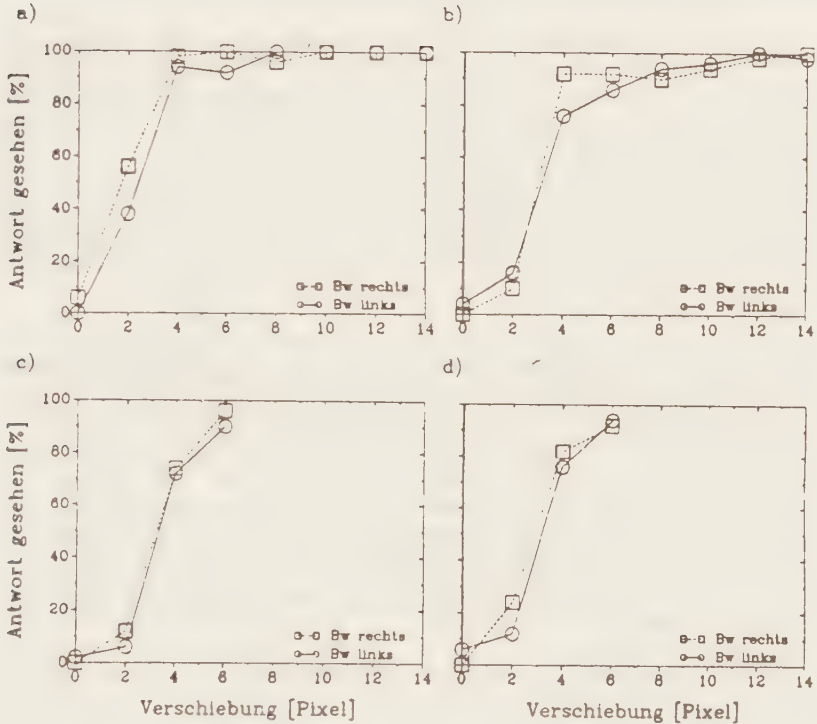


Bild 5.3.9: Meßergebnisse bei induzierender Bewegung. Vergleich der Bewegungsrichtungen (rechts/links) des Testobjekts bei verschiedenen Objektabständen (96/192) für zwei Versuchspersonen (ES: a).b); KG: b).c)).
a), c) : Objektabstand 96
b), d) : Objektabstand 192

Alle Teilbilder zeigen im Rahmen der Meßgenauigkeit keine bzw. nur eine sehr geringe Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung des Testobjekts. Lediglich im Bild 5.3.9a) und d) liegen die quadratischen Symbole, die eine Bewegung nach rechts markieren, etwas deutlicher über den Kreisen für eine Bewegung nach links. Im Mittel ist bei beiden VPs die Bewegungsrichtung rechts etwas bevorzugt.

Es fällt auf, daß alle Teilbilder auch bei dem Verschiebungswert 0 schon positive Antworten aufweisen. Die induzierende Bewegung zeigt hier sogar eine

Art von Übersprechen auf das Testobjekt, dem dadurch eine Bewegung zugeordnet wird, die physikalisch nicht vorhanden ist. Es ist auch nicht ganz auszuschließen, daß bewußte oder auch unbewußte Augenbewegungen das visuelle System hier zu einer Bewegungswahrnehmung anregen.

Die Versuchsperson ES zeigt eine bessere Verschiebungswahrnehmung als KG. Für 90% der Antworten "gesehen" reichen ES ein Verschiebung von ca. 4 Pixel, während es bei KG 6 Pixel sind. Als eine mögliche Ursache dieser Differenzen kann auch, da beide Testperson Brillenträger sind, die Güte der Fehlsichtigkeitskorrektur angesehen werden.

Vergleicht man die Steigungen dieser Kurven mit denen aus der Blinkmessung, so fallen die durchweg höheren Werte auf. Die Existenz einer induzierenden Bewegung hebt also die Erkennbarkeit der Testobjektbewegung über den gesamten Bereich der Verschiebungswerte gleichmäßig an.

Nachdem sich nur geringe Unterschiede in den Bewegungsrichtungen zeigten, ist hier die Mittelwertbildung über alle Richtungen eine zulässige Auswertemethode, die die Resultate nicht verfälscht oder vorhandene Effekte unterdrückt. In Bild 5.8.10 wurden die Bewegungsmittelwerte zur Analyse der Abhängigkeiten von den Objektabständen benutzt. Man sieht, daß für beide Versuchspersonen die Erkennbarkeit des Testobjekts bei Objektabstand 96 (Kreissymbol) besser ist als bei Objektabstand 192 (Quadratsymbol). Die unterschiedliche Größe der Schwellenerniedrigung bei den VPs ist zum Teil auch auf die verschiedenen Bewegungsrichtungen des Testobjekts zurückzuführen. ES hatte nur links/rechts als mögliche Bewegungen, während KG auf links/rechts/oben/unten reagieren mußte.

Generell läßt sich feststellen, daß eine ausgeprägte Richtungsabhängigkeit nur in den Kontrollmessungen existiert. Die Induktion übersteuert diesen Effekt und hebt ihn auf.

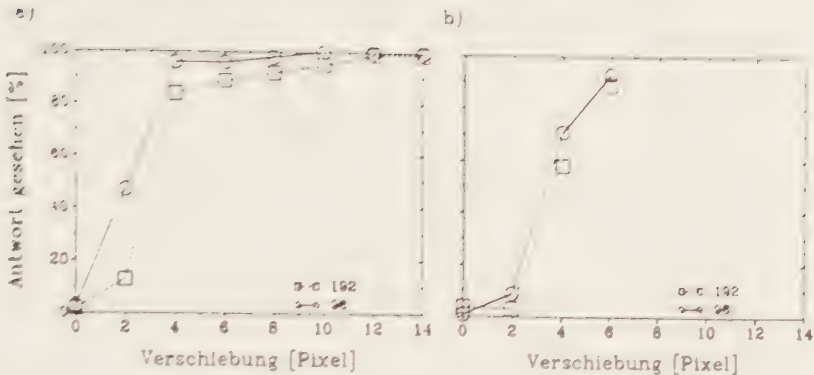


Bild 5.3.10 Verschiebungsschwellenmessung mit induzierter Bewegung. Vergleich der Abstände induzierendes Objekt - Testobjekt 96 (Kreissymbole) und 192 (Quadratsymbole). Mittel über die Testobjektbewegungsrichtungen rechts/links.

a) VP = ES, Bewegungsalternativen rechts/links

b) VP = KG, Bewegungsalternativen rechts/links/oben/unten

Die Erweiterung in den Objektabstandsvariationen stellt den nächsten Schritt in den Verschiebungsexperimenten dar. Das Induzierende Objekt ist jetzt nur in der linken Gesichtsfeldhälfte vorhanden, das Testobjekt in der rechten. Der Induktionsreiz besteht aus einer Verschiebung des Objekts um 14 Pixel mit einer Geschwindigkeit von 2 Pixeln pro 20ms nach rechts. Das Testobjekt kann sich nach dem Ende der induzierenden Bewegung in die vier Richtungen links, rechts, oben und unten verschieben. Der Startzeitpunkt dieser Bewegung errechnet sich aus den Abständen und der Geschwindigkeit gemäß Gleichung (9). Die Objektabstände sind in sieben 32 Pixelschritten von 32 bis 224 gewählt. Die Geschwindigkeit beträgt für beide Objekte 2 Pixel pro 20ms (1.5°/s).

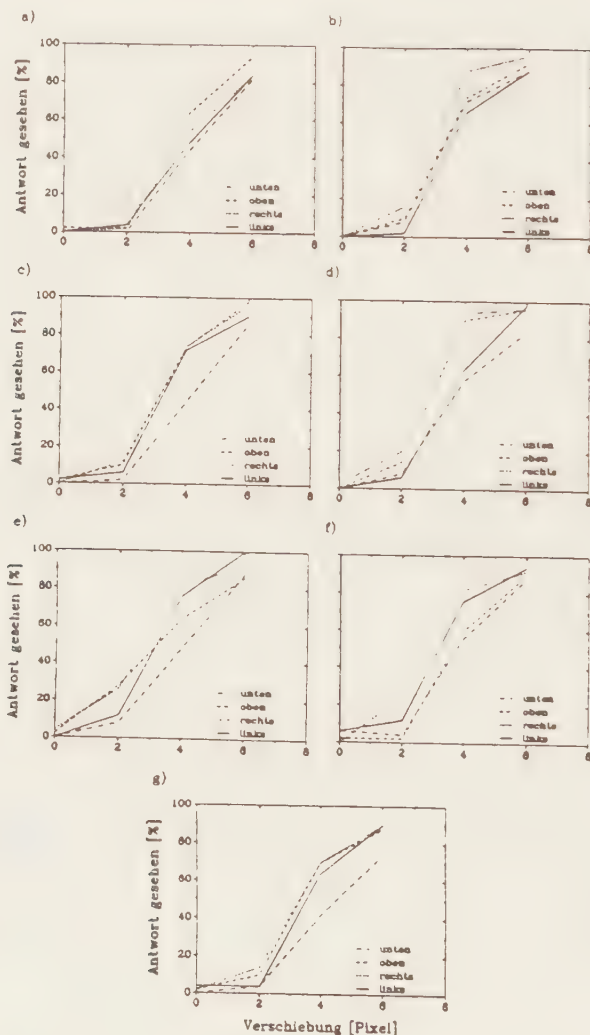


Bild 5.3.11: Verschiebungsmessung mit induzierender Bewegung. Induktion durch Objekt im linken Gesichtsfeld mit einer Bewegung von 14 Pixeln (0.21°) nach rechts und der Geschwindigkeit 2 Pixel/20ms ($1.5^\circ/s$). Testobjekt im rechten Gesichtsfeld mit gleicher Geschwindigkeit und den Bewegungsrichtungen links / rechts / oben / unten. Vergleich der Ort- Zeitabstände. VP = KG.

a) Abstand 32 (0.47°)

b) Abstand 64 (0.95°)

c) Abstand 96 (1.42°)

d) Abstand 128 (1.89°)

e) Abstand 160 (2.36°)

f) Abstand 192 (2.84°)

g) Abstand 224 (3.31°)

Die Messungen zu allen Teilbildern von Bild 5.3.11 benutzten als maximale Objektverschiebungstrecke 6 Pixel, da sich in entsprechenden Vorexperimenten gezeigt hatte, daß spätestens nach einem Versatz von 8 Pixeln die 95% - Marke unter allen Bedingungen überschritten wird. Dadurch konnte bei gleicher Zeitdauer der experimentellen Sitzungen die Zahl der Tests mit relevanten Parameterkonstellationen erhöht werden.

Die Daten lassen sich in zwei relativ gut trennbare Gruppen aufspalten. In der Regel sind bei allen Bewegungsrichtungen die Verschiebungen des Testobjekts nach links oder nach unten schlechter erkennbar als Bewegungen nach rechts oder oben. Als Einhüllende einer jeden Kurvenschar kann man die Verschiebungen nach rechts und unten betrachten. Eine Testobjektbewegung nach unten besitzt bei fast allen Abständen (bis auf den Abstand 64) die kleinste Erkennbarkeit aller Richtungen. Die Wahrnehmung von Bewegungen nach rechts, d.h. in Richtung der induzierenden Bewegung, ist in der Regel allen anderen Richtungen gegenüber bevorzugt.

Bei allen Objektabständen, die größer als 32 sind, ist im Gegensatz zur Kurve a) ein mehr oder weniger stark ausgeprägter Knick bei 4 Pixeln Verschiebung zu beobachten. Die Sonderstellung des Abstandes 32 zeigt sich auch bei der Streuung und der absoluten Größe der Antwortwerte bei Verschiebung 2. Alle anderen Kurven streuen hier relativ stark und liegen im Mittel um ca. 10 Einheiten höher. Der Einfluß der induzierenden Bewegung auf das Testobjekt ist hier scheinbar von anderer Natur bzw. (noch) nicht vorhanden. Ursache dafür könnte neben dem zu geringen Ortsabstand auch die zu kleine Zeitspanne zwischen Induktion und Test sein.

Die Sonderstellung des Objektabstandswertes 32 zeigt sich besonders, wenn man die Richtungsunterschiede in den Ergebnissen außer acht läßt und eine Mittelwertbildung durchführt. In Bild 5.3.12 sind die Mittelwerte der Bewegungsrichtungen bei den Abständen 32-192 aufgetragen. Abstand 32 (durchgezogene Linie) ist deutlich von der Kurvenschar der anderen Abstände abgesetzt und weist die niedrigsten Wahrnehmungshäufigkeiten auf.

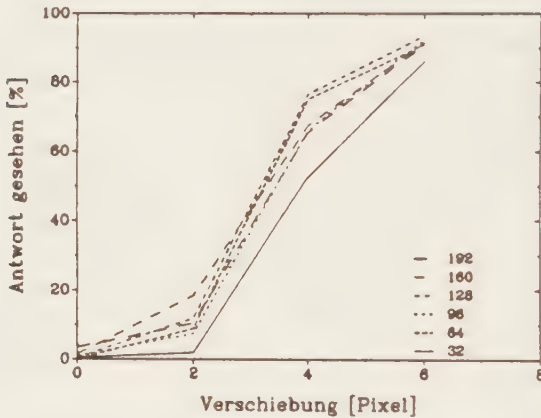


Bild 5.3.12: Verschiebungsmessung mit induzierender Bewegung.
Mittelwertbildung über alle Richtungen aus Bild 5.3.11. Objekt-
abstände: 32, 64, 96, 128, 160, 192.

Da in dieser experimentellen Variante die induzierende Bewegung im linken Gesichtsfeld mit einer Bewegung nach rechts stattfindet, kann man vermuten, daß sich dadurch eine Abhängigkeit der Erkennbarkeit von der Testobjektbewegungsrichtung einstellt. In Bild 5.3.13 sind die Ergebnisse aus Bild 5.3.11 noch einmal nach den Richtungen links / rechts aufgetrennt. Es zeigt sich, daß tatsächlich eine Bewegung nach rechts im allgemeinen leichter zu erkennen ist. Die Richtungsabhängigkeit aus den Kontrollmessungen verschwindet, und es stellt sich ein Induktionseffekt trotz anwachsenden Rezeptordurchmessers ein. Nur beim kleinsten Objekt-
abstand (32) ist die Wirkung der induzierenden Bewegung nicht vorhanden und keine Trennung zwischen links und rechts zu erkennen.

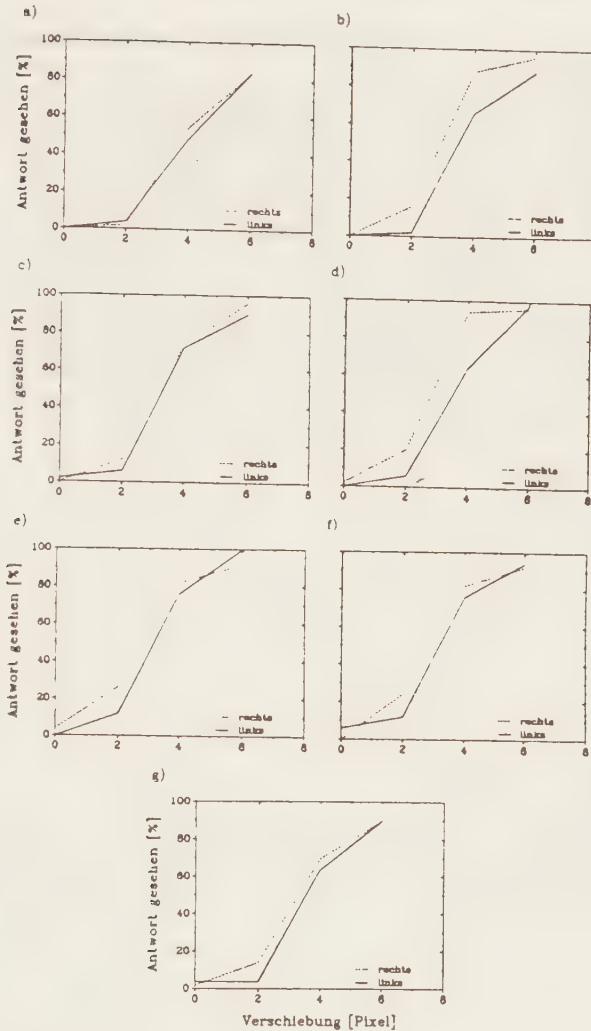


Bild 5.3.13: Verschiebungsschwellenmessung mit induzierender Bewegung. Ergebnisse aus Bild 5.3.11 aufgetrennt nach Testobjektbewegungsrichtungen links / rechts. VP = KG.

a) Abstand 32 (0.47°)

b) Abstand 64 (0.95°)

c) Abstand 96 (1.42°)

d) Abstand 128 (1.89°)

e) Abstand 160 (2.36°)

f) Abstand 192 (2.84°)

g) Abstand 224 (3.31°)

Wenn man den Abstand 96 außer acht läßt, so kann man mit steigendem Objekt-Abstand ein Anwachsen der Differenz zwischen rechts und links bis zu

einem Maximalwert (128) beobachten. Danach geht der Unterschied in den Bewegungsrichtungen wieder zurück.

In der folgenden Versuchsreihe interessiert nicht der Abstand der Objekte, sondern Abhängigkeiten, die in den Bewegungsrichtungen und den beiden Gesichtsfeldhälften ihre Ursache haben können. Dazu wird der Objekt Ort- und Zeitabstand auf 192 Pixel bzw. 960ms festgehalten und auf die Bewegungserkennung des Testobjekts im linken oder rechten Gesichtsfeld mit Bewegungsrichtung nach oben oder unten getestet. Auch die Induktionsbewegungen sind auf die Richtungen nach oben und unten beschränkt. Durch diese Wahl der Parameter stehen die Richtungen der Bewegungen senkrecht auf der Verbindungslinie beider Objekte. Im Versuch sind die Bewegungsrichtungen und die Gesichtsfeldseiten zufällig gemischt. In Bild 5.3.14a) und b) sind die Resultate nach gegen- oder gleichsinniger Bewegungsrichtung aufgetragen. In c) und d) wird nach den Gesichtsfeldhälften unterschieden.

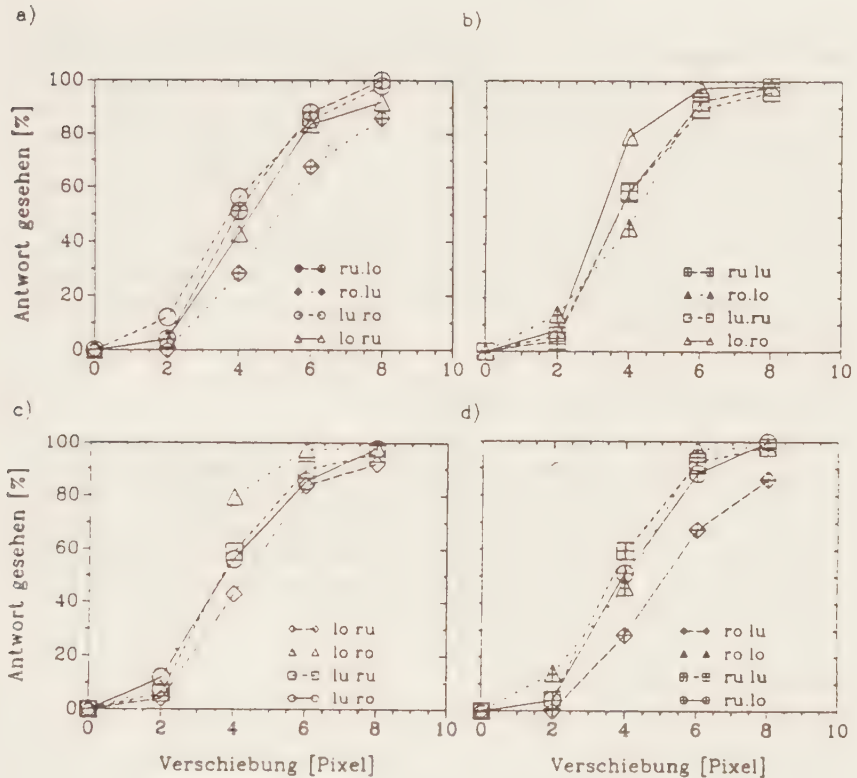


Bild 5.3.14: Verschiebungsschwellenmessung mit induzierender Bewegung. Testobjekt in linker oder rechter Gesichtsfeldhälfte mit Bewegung nach oben oder unten. Induzierendes Objekt mit Bewegung nach oben oder unten und korrespondierender Gesichtsfeldseite. Abstand der Objekte 192 Pixels (2.84°). VP = KG.

Erklärung der Legende: Buchstaben vor dem Punkt beschreiben das Induktionsobjekt, Buchstaben danach das Testobjekt. r = rechter Halbraum, l = linker Halbraum, u = Bewegung nach unten, o = Bewegung nach oben.

a) Bewegung von Test und Induktionsobjekt gegensinnig

b) Bewegung von Test und Induktionsobjekt gleichsinnig

c) Testobjekt im rechten Halbraum

d) Testobjekt im linken Halbraum

In Bild 5.3.14 a) und b) treten die Unterschiede zwischen gleich- und gegensinnigen Bewegungen von Test- und Induktionsobjekt deutlich hervor. Die Kurvenschar gegensinniger Bewegungen verläuft wesentlich flacher. Die Verschiebungsschwellen bei gleichen Bewegungsrichtungen sind also niedriger als bei Gegensinnigen. Sowohl in Bild 5.3.14 c) als auch d) sind Testobjektbe-

wegungen nach oben bevorzugt, unabhängig von der Gesichtsfeldtesthälfte. Die größten Differenzen in den Antworten "gesehen" kann man zwischen Induktion im rechten Gesichtsfeld mit Bewegung nach oben und Test nach unten (ro.lu) und Induktion im linken Gesichtsfeld mit Bewegung nach oben und Test nach oben (lo.ro) beobachten. Die geometrische Anordnung der Objekte spielt hierbei sicher eine wichtige Rolle.

Einflüsse einer induzierenden Bewegung im linken oder rechten Halbraum auf die Erkennbarkeit der Testbewegung faßt Bild 5.3.14 c) und d) zusammen. Kurven mit Induktion nach oben bilden in beiden Fällen die Einhüllenden, wobei gleichsinnige Bewegungen jeweils am besten, gegensinnige am schlechtesten zu erkennen sind.

5.3.4 Vergleich von Verschiebungsschwellen

Der direkte Vergleich von Originaldaten, die noch keiner Verarbeitung unterzogen worden sind, soll Aufschluß über mögliche wechselseitige Einflüsse von induzierender Objektbewegung auf die Testobjektbewegung geben. Die Daten sollen Antwort auf die grundlegende Frage geben: Macht sich das visuelle System die in einem lokalen retinalen Gebiet vorhandene Bewegungsinformation zunutze, und kann es in benachbarten Retinabereichen die Empfindlichkeit für die Erkennung von Bewegungen erhöhen?

5.3.4.1 Mit und ohne Induzierung

Die Frage nach irgendeinem Einfluß der induzierenden Bewegung auf die Bewegung des Testobjekts kann mit Bild 5.3.15 beantwortet werden. Als Bezugsnullmessung wurden die Ergebnisse eines Kontroll-experiments mit nur einem Objekt im linken Gesichtsfeld, das sich nach links oder rechts bewegen konnte, benutzt. Das Induzierende Objekt der Induktionsmessung bewegte sich in der rechten Gesichtsfeldhälfte nach rechts oder links. Die Teilbilder von 5.3.15 zeigen noch die Folgen der Variation von Abstand und Bewegungsrichtung (links.rechts).

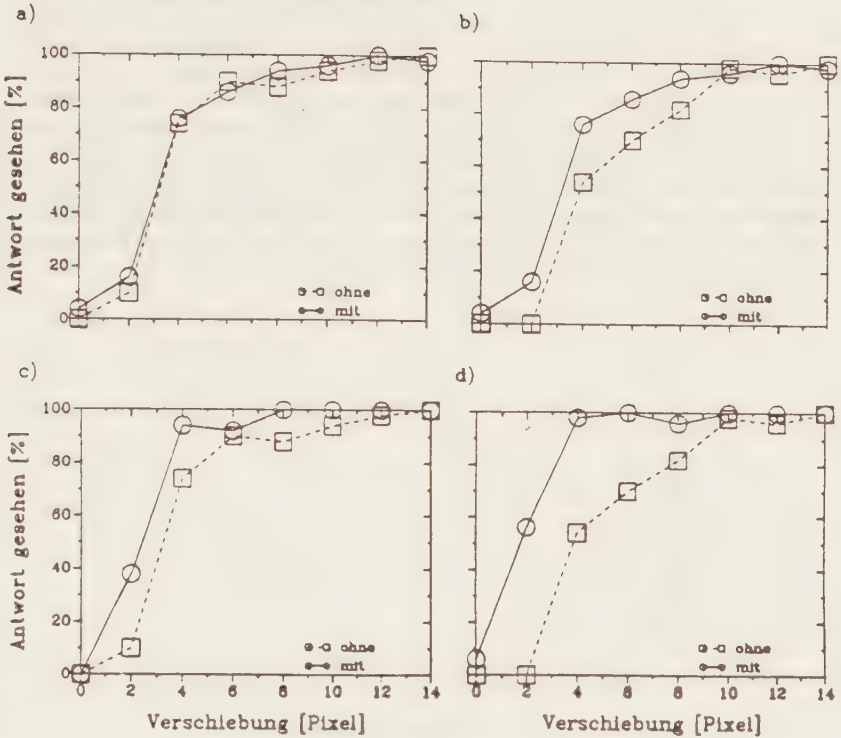


Bild 5.3.15: Vergleich von Verschiebungsschwellenmessungen mit und ohne induzierender Bewegung. Bezugsnullmessung: ein Objekt in der linken Gesichtsfeldhälfte, Bewegung nach links oder rechts. Induktionsmessung: induzierendes Objekt rechts, Bewegung nach links oder rechts; Testobjekt links, Bewegung nach links oder rechts. Anordnung der Objekte nach Bild 5.2.1. Die Bewegungen bei der Induktionsmessung sind gleichsinnig. VP = ES.

- a) Objektabstand 96 Pixel, Testbewegung nach links
- b) Objektabstand 96 Pixel, Testbewegung nach rechts
- c) Objektabstand 192 Pixel, Testbewegung nach links
- d) Objektabstand 192 Pixel, Testbewegung nach rechts.

Mit Ausnahme von Teilbild a) ist in Bild 5.3.15 überall eine Verbesserung der Erkennbarkeit durch die Einführung einer induzierenden Bewegung zu sehen. Der Effekt tritt bei Bewegungen nach rechts und links auf, und zwar bei beiden möglichen Objektabständen. Die Bewegungsrichtung links zeigt die kleinste Reduzierung der Erkennbarkeit. Am deutlichsten tritt der Induktions-einfluß beim Abstand 192 und einer Bewegung nach rechts zutage. Die Unterschiede zwischen Verschiebungen nach links oder rechts zeigen, daß von

einer Induktionsbewegung in Richtung der Sehachse (rechtes Objekt mit Bewegung nach links) ein stärkerer Einfluß ausgeht als in umgekehrter Richtung.

Vernachlässigt man Einflüsse, die durch unterschiedliche Bewegungsrichtungen und Objektabstände verursacht sein könnten und führt zur Verdeutlichung des Induktionseffekte eine Mittelung über beide Parameter durch, so erhält man die gestichelte Kurve aus Bild 5.3.16. Im Gegensatz zu Bild 5.3.15 besteht - aus Gründen der besseren Vergleichbarkeit mit der Objektanordnung im Induktionsversuch - die Nullmessung aus einem Experiment mit zwei Objekten, von denen sich entweder das linke oder das rechte nach links oder rechts bewegt.

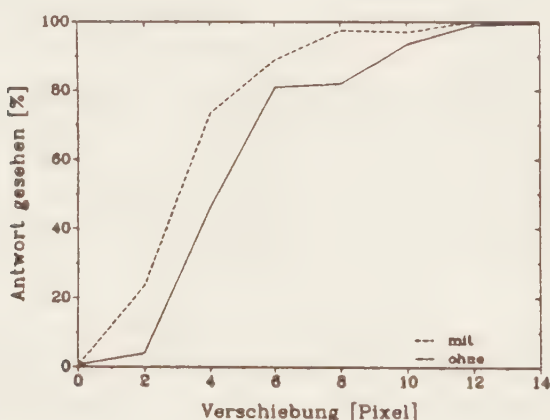


Bild 5.3.16: Vergleich von Verschiebungsschwellenmessungen mit und ohne induzierender Bewegung. Mittelwertbildung über Objektabstände (96, 192) und Bewegungsrichtungen (links, rechts). VP = ES.

Der Induktionseffekt tritt auch hier deutlich hervor. Schon bei Verschiebungen um 2 Pixel setzt die Erhöhung der Prozentzahl der Antworten "gesehen" um ca. 20% ein. Dieser Betrag bleibt bis ungefähr acht Pixel Objektverschiebung erhalten. Die S-förmige Kurve der Kontrollmessung wird gleichsam als Ganzes um etwa ein Pixel nach links verschoben. Die Steigungen im Bereich der Wendepunkte der Kurven sind nahezu gleich. Die Erniedrigung der Verschiebungsschwelle durch Bewegungen mit und ohne Induktion beträgt also bei der hier angewandten Mittelwertbildung etwa 1 Pixel oder 0.015° Sehwinkel.

5.3.4.2 Aufblinken und Induktionsbewegung

Die Aussagekraft eines Vergleichs zwischen Daten mit und ohne induzierender Bewegung läßt sich durch die Ausführung des Blinkexperiments steigern. Blink- und Induktionsversuch unterscheiden sich nur durch die beim Blinkexperiment fehlende Bewegungsinformation des induzierenden Objekts. Alle anderen Parameter sind gleich und können im gleichen Rahmen variieren. Bild 5.3.17a)-g) zeigt die Ergebnisse für Bewegungen nach rechts und links (Bw r, Bw l) und Objektabständen von 32 bis 224 Pixel. Kreis- und Dreiecksymbol stehen für die Induktionsbewegung nach links bzw. rechts, Quadrat und Raute für den Blinkversuch mit Bewegung nach links bzw. rechts.

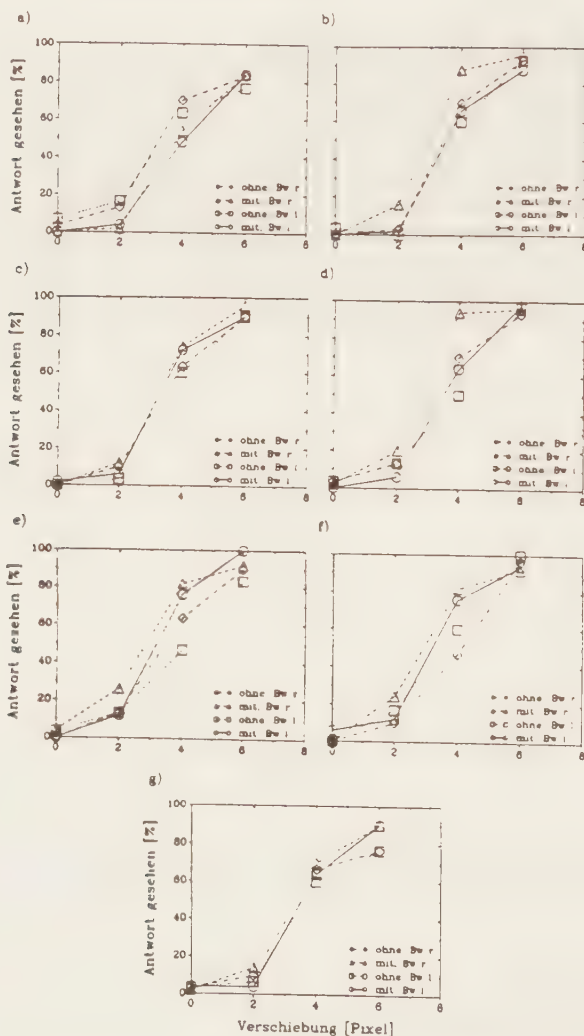


Bild 5.3.17: Vergleich von Verschiebungsschwellenmessungen mit und ohne induzierender Bewegung. Antwort gesehen auf Bewegung des Testobjekts. Kreis- und Dreieckssymbole: Induktionsmessung mit Testobjektbewegung nach links bzw. rechts. Quadrat- und Rautensymbol: Blinkmessung mit Testobjekt nach links bzw. rechts. Induktions- und Blinkobjekt in der linken unteren Gesichtsfeldhälfte, Testobjekt rechts oben. Bw r/l = Testobjektbewegung nach rechts/links. ohne/mit = ohne induzierende Bewegung (Blinkversuch) / mit induzierender Bewegung. VP = KG.
Parameter Objektabstand [Pixel]:
a) 32 b) 64 c) 96 d) 128
e) 160 f) 192 g) 224

Betrachtet man die Teilbilder c)-g), so ist zu erkennen, daß die Kurvenschar sich von Bild zu Bild aufweitert und dann wieder zusammenfällt. Die Kurven, die die Induktionsmessung repräsentieren (Kreis- und Dreiecksymbol), stehen in allen Fällen über den dazugehörigen Blinkmeßkurven. Auf Testobjektbewegungen nach rechts (Dreieck- und Rautensymbol in Bild 5.3.17) reagiert die Versuchsperson mit etwas höheren Prozentwerten von Antworten "gesehen". Diese Bevorzugung der Bewegung nach rechts tritt in der Hauptsache bei den Objektabständen 128, 160 und 192 Pixel auf und deutet auf eine Wechselwirkung mit der ebenfalls nach rechts erfolgenden Induktionsbewegung hin. Das Einsetzen des Effekts mit wachsendem Objektabstand ist bei 32 und 64 Pixel zu beobachten. Bei Abstand 32 (Bild 5.3.17b)) liegen die Kurven der induzierenden Bewegung noch unter den Blinkmeßkurven. Hier liegt also eine negative Beeinflussung des Testobjekts durch die Induktionsbewegung vor. Bei einem Abstand von 64 Pixeln (Bild 5.3.17a)) setzt sich der Induktionseinfluß allmählich durch, und es erfolgt eine deutliche Verbesserung der Erkennbarkeit für Testobjektbewegungen entsprechend der Induktion nach rechts.

5.3.5 Auswertemethoden

Der S-förmige Kurvenverlauf der Meßergebnisse erinnert in seiner Form stark an eine kummulierte Gaußfunktion, die als Integral definiert ist:

$$P(x) = \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-t^2/2\sigma^2} dt \quad (10)$$

Eine Gaußfunktion in (10) überrascht nicht, wenn man nach SIXTL (1967) eine Normalverteilung als Abbildungsfunktion eines physikalischen Reizes auf die physiologische Reaktionsebene der VP voraussetzt. Unter der Reaktionsebene befindet sich die Ebene der bewußten Wahrnehmung, in der je nach Lage der physiologischen Reaktion und des Entscheidungskriteriums eine Antwort auf den Reiz erfolgt (siehe Bild 5.3.18).

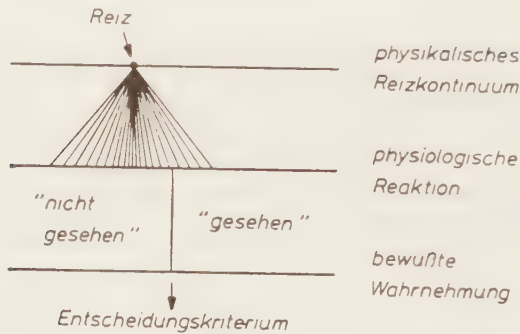


Bild 5.3.18: Abbildung eines physikalischen Reizes auf die Ebene der bewußten Wahrnehmung. nach SIXTL (1967).

Als Approximation von (10) für positive x-Werte und $\sigma = 1$ kann nach ABRAMOWITZ (1972) die Funktion

$$P(x) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (1 - e^{-2x^2/\pi})^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

gewählt werden. Der dabei entstehende Fehler ist nur im Bereich [0.4, 3.2] von Bedeutung und erreicht als Maximalwert nur ca. 0.004 Einheiten. Aus (11) leitet sich die zur Anpassung an die Meßdaten benutzte Gleichung direkt ab:

$$P(x) = \begin{cases} p_1 + p_1 \cdot (1 - e^{-(x-p_2)^2/p_3})^{\frac{1}{2}} & \text{für } x \geq p_2 \\ p_1 - p_1 \cdot (1 - e^{-(x-p_2)^2/p_3})^{\frac{1}{2}} & \text{für } x < p_2. \end{cases} \quad (12)$$

Da sich der Wertebereich der Daten im Intervall [0, 100] bewegt, setzt man p_1 auf 50%. Der Parameter p_2 bestimmt den Ort des Wendepunkts oder entsprechend den Scheitelpunkt der Gaußfunktion. Aus dem symmetrischen Kurvenverlauf folgt sofort, daß der Wendepunkt bei einer Wahrnehmungshäufigkeit von 50% liegt, und somit p_2 dem gesuchten Schwellenwert m entspricht. Der dritte Parameter p_3 ist mit der Steigung der Funktion $P(x)$ (Gleichung 10) bei 50% bzw. mit der Schwankungsbreite σ der unter dem Integral stehenden Gaußfunktion verknüpft. Die Parameter p_3 und p_2 lassen sich mittels einer nichtlinearen Regression aus den experimentell gewonnen Kurven ableiten.

In Bild 5.3.19 Kurve a) wurde diese Anpassung für die Daten einer Kontrollmessung durchgeführt. Im Bereich einer Verschiebung von 2 bis 4 Pixeln, die für die Ermittlung der Schwelle bei 50% entscheidend sind, kann man eine gute Übereinstimmung der experimentellen Daten mit der modellierten Kurve beobachten. Bei den Kurven b) und c) wurde der Parameter p_3 auf 5.74 bzw.

8.60 ($\pm 20\%$) festgehalten. Dies hat fast keine Auswirkung auf den Schwellenwert p_2 . Da für alle Kurven die 50%-Schwelle den Symmetriepunkt der Funktion darstellt, müssen auch dort ihre Wendepunkte liegen. Eine Verschiebung der Wendepunkte würde aber die Symmetrie der nichtlinearen Regressionsfunktion zerstören. Im Prinzip sind daher die Anpassungskurven unabhängig vom Parameter p_3 . Eine willkürliche Festlegung von p_3 erzeugt Kurven die unter Umständen nur noch am Wendepunkt in der Nähe der tatsächlichen Meßpunkte liegen und damit für die Auswertung eigentlich ohne Bedeutung sind. Die Qualität der Auswertung ist dann von der Genauigkeit des Wertes bei 50% abhängig.

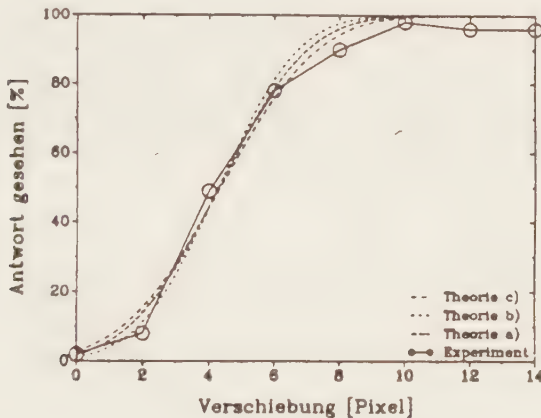


Bild 5.3.19: Vergleich von experimentellen Daten eines Kontrollversuchs mit dem mittels nichtlinearer Regression modellierten Integral über eine Gaußfunktion (Fehlerfunktion nach Gleichung (12)). Optimale Anpassung mit:

- a) $p_1 = 50$, $p_2 = 4.30$, $p_3 = 7.17$
- b) $p_1 = 50$, $p_2 = 4.30$, $p_3 = 5.74$
- c) $p_1 = 50$, $p_2 = 4.35$, $p_3 = 8.60$

Neben der Fehlerfunktion lassen sich natürlich auch andere Funktionen zur Bestimmung von Schwelle und Steigung heranziehen. So bietet sich zum Beispiel die logistische Funktion an, die oft als psychometrische Funktion bei Schwellenmessung Verwendung findet:

$$P(x) = p_1 / (1 + e^{-p_3 \cdot (x - p_2)}) \quad (13)$$

Mit $p_1 = 100$ sind bei einer nichtlinearen Regression die Parameter p_2 (50%-Schwelle) und p_3 (Steilheit der Kurven) zu schätzen. Dabei stellt sich für p_3 ein Wert zwischen 0.8 und 1.2 ein. Die Schwellenwerte (p_2) stimmen bis

auf einige Promille mit den Werten aus (12) überein. Schwellennahe Meßpunkte fallen hier ebenfalls stärker ins Gewicht.

Das nachfolgend beschriebene Summierungsverfahren (Bild 5.3.20) erlaubt die gleichmäßige Berücksichtigung aller Meßdaten. Es werden alle Meßwerte aus dem Meßintervall $[N_s, N]$ summiert. Vorausgesetzt wird, daß die Meßwerte im Intervall $[N_s, N_u]$ immer gleich null sind und im Intervall $[N_u, N]$ immer ihr Maximum erreichen (100%). Zwischen diesen Intervallen liegt in der Regel ein Übergangsbereich $[N_u, N_o]$ in dem die Datenwerte von 0 bis 100% reichen.

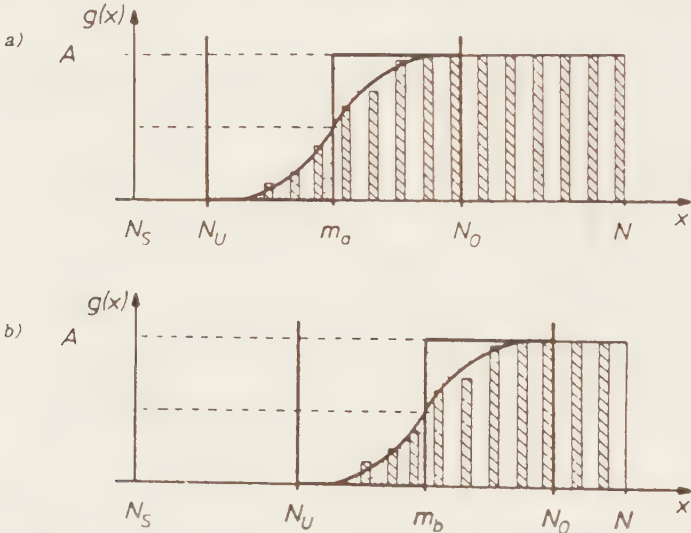


Bild 5.3.20: Meßwertsummierungsverfahren zur Schwellenbestimmung. Bei festem Meßintervall $[N_s, N]$ ist die Summe der Meßwerte ein Maß für die Schwelle. Hier gilt: $m_a < m_b$. $\Sigma(\text{Daten von a)}) > \Sigma(\text{Daten von b)})$
 a) Summe groß, Schwelle klein
 b) Summe klein, Schwelle groß

Die Intervallgrenzen werden so gewählt, daß die Schwelle m in der Mitte von $[N_u, N_o]$ liegt. Setzt man als Funktionsverlauf in diesem Intervall die Anwendbarkeit von (12) voraus, so kann man das Integral über $[N_s, N]$ berechnen:

$$A \cdot \int_{N_s}^N g(x) dx = A \cdot (N_u - N_s) + A \cdot \int_{N_u}^{N_o} P(x) dx + A \cdot (N - N_o) \quad (14)$$

Die linke Seite von (14) ist aber nichts anderes als die Summe n von l Meßwerten. Die Größe dieser Summe liefert ein Maß für die Erkennbarkeit des

Testobjekts und ist proportional zum Schwellenwert. Das bestimmte Integral über $P(x)$ läßt sich leicht berechnen, da die symmetrischen Anteile sich gegenseitig wegheben, und nur noch ein Anteil äquivalent einer Stufenfunktion am Ort m , der dem zu schätzenden Wert von p_2 von oben entspricht, übrig bleibt:

$$n = \sum_{i=1}^I x_i = A \cdot N_u + A \cdot (N_o - m) + A \cdot (N - N_o) \quad (15)$$

Auflösen nach m ergibt:

$$m = N + N_u - n/A \quad (16)$$

Da in diesem Experiment die Meßdaten vor N_u den Wert null nicht unterschreiten können, kann man $N_u = 0$ setzen. Die Funktion $P(x)$ ist bei diesem Verfahren nicht explizit festgelegt. Es wurde nur ihre Symmetrieeigenschaft vorausgesetzt. Einzige Bedingung ist, daß $P(x)$ an den Intervallgrenzen N_u und N_o auf null abklingt bzw. auf 100% anwächst. Somit gehen keine Parameter wie z.B. p_2 aus Gleichung (12) oder (13) in die Auswertung ein. Die Forderung, daß $P(x)$ symmetrisch im Intervall $[N_u, N_o]$ von 0% auf 100% anwächst, kann aufgehoben werden, falls nur die Summe (Gleichung (15)) aller im Meßintervall erzielten Antworten "gesehen" als Maß für eine relative Erkennbarkeit eines Verschiebungsschwellenversuchs herangezogen wird (siehe Kapitel 5.3.6.3).

Einzelmessungen können natürlich nur dann miteinander verglichen werden, wenn die Definitionsbereiche der Daten (N) jeweils gleich sind. Mit einer einfachen Normierung durch die Amplitude A aus Gleichung (16) können unterschiedliche Datenbereiche einander angepaßt werden.

Setzt man den mittleren Fehler für einen Verschiebungsort auf 5% der Antworten "gesehen", so läßt sich mit der Fehlerfortpflanzung bei der Addition der Fehler für jede Verschiebungsdatensumme auf $\pm 4\%$ relative Erkennbarkeitseinheiten abschätzen. Demzufolge kann die aus Gleichung (16) bestimmte Schwelle mit einem Fehler von ebenfalls $\pm 4\%$ angegeben werden. Die Symbolgrößen in den Diagrammen entsprechen ungefähr diesen Fehlerabschätzungen.

Einen Vergleich zwischen dem Auswerteverfahren mit nichtlinearer Regression und mit Summation der Daten zeigt Bild 5.3.21. Aufgetragen sind die berechneten Verschiebungsschwellen über dem Abstand von induzierendem Objekt und Testobjekt.

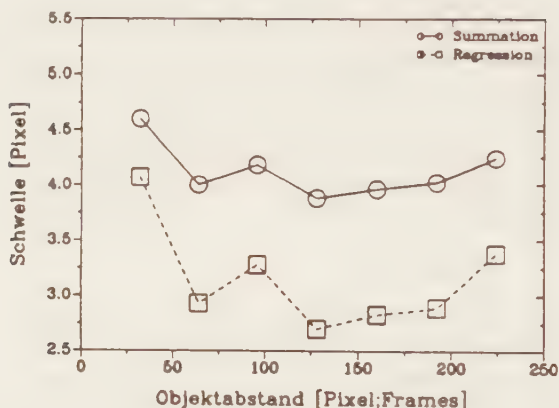


Bild 5.3.21: Vergleich der Auswerteverfahren: nichtlineare Regression, Summation der Meßdaten.

Zwei wesentliche Unterschiede zwischen der Summations- und Regressionsmethode fallen auf. Zum einen liegen die Regressionswerte alle unterhalb der Summationspunkte, zum anderen ist die Schwankungsbreite der Summationsschwellenkurve deutlich geringer. Die Summenbildung erzeugt also ein Anheben der 50%-Schwelle. Durch die Annahme einer (beliebigen) symmetrischen Schwellenfunktion werden die Meßpunkte als gleichmäßig um die 50%-Marke verteilt angenommen. Da aber auf Grund der experimentellen Gegebenheiten (nicht jeder Verschiebungsbetrag ist realisierbar) die Symmetrie der Meßdaten sich immer etwas zu Gunsten größerer Verschiebungswerte neigt, steigt auch der daraus resultierende Schwellenwert m . Die gleichzeitige Dämpfung der Kurve zeigt, daß durch das gleichberechtigte Benutzen aller Meßdaten eine quantitative Verbesserung der Ergebnisse durch die Summationsmethode möglich ist.

Die bei Verschiebungsschwellenexperimenten häufig auftretenden Schwierigkeiten mit der Reproduzierbarkeit können mit dem Summationsverfahren als Auswertemethode vermindert werden und so zu einer Erweiterung von psychophysikalischen Experimenten dieser Art führen (DENK, 1987).

5.3.6 Diskussion der Ergebnisse aus den Verschiebungsschwellenexperimenten

Das Verschiebungsexperiment zeichnet sich durch die Einfachheit der experimentellen Realisierbarkeit und des Entscheidungskriteriums der Versuchsperson aus. Im Gegensatz zu aufwendigen Rating Scale Meßverfahren (GREEN, 1974) wird nur ein einfaches "ja, gesehen" oder "nein, nicht gesehen"

verlangt. Durch die Mischung von vielen Parametern läßt sich auch eine lange Versuchsreihe für die VP abwechslungsreich gestalten.

Der Unterschied zu den in der Literatur beschriebenen Verschiebungsexperimenten besteht in drei wesentlichen Punkten: der Wahl der Objektdimensionen, der Exzentrizität und den Bewegungsmöglichkeiten des Referenzobjekts (Induktionsobjekts). In den meisten Experimenten aus der Literatur (JOHNSON, 1980; JOHNSON, 1982) sind nur linienhafte Teststrukturen verwendet worden. Die Exzentrizität der Präsentation ist entweder nur foveal oder peripher. Eingblendete Referenzobjekte sind ortsfest. Im oben beschriebenen Experiment sind hingegen ein oder zwei sich bewegende, flächenhafte Objekte bei einer Exzentrizität von 0.24° bis 1.65° , dem Übergangsgebiet zwischen Fovea und Peripherie, verwendet worden. Vergleiche mit der Literatur sind somit nur sehr eingeschränkt möglich.

Ziel einer solchen Parameterauswahl ist es, den Testobjekten die oft vorhandene Realitätsferne zu nehmen. In unserer natürlichen Umwelt erscheinen Objekte in der Regel flächenhaft, überschwellig und meist auch nicht direkt foveal oder peripher.

Mit den Vorversuchen ist der Rahmen einer sinnvollen Parameterauswahl sowie deren Variation abgesteckt worden. Da keine signifikante Geschwindigkeitsabhängigkeit festgestellt wurde, und beide betrachteten Objekte keine Geschwindigkeitsdifferenz besitzen sollten, sind die Bewegungsgeschwindigkeiten auf 2 Pixel pro 20ms ($0.7^\circ/\text{s}$) festgesetzt worden. Diese Geschwindigkeit paßt gut in das Orts- und Zeitraster des Farbmustergenerators und erzeugt auf dem Monitor eine für den Betrachter angenehme, ruckfreie Bewegung, die auch ohne Anstrengung mit einer Augenfolgebewegung verfolgt werden kann.

Die Ausdehnung des Induktionsbereiches beträgt nur ca. 0.2° . Für eine foveale Beobachtung kann dann ein homogenes Rezeptorraster angenommen werden. Dies ändert sich jedoch drastisch bei extrafovealem Beobachtungsreizen (siehe dazu Kapitel 5.3.6.1).

Prinzipiell kann der Induktionsvorgang als ein Adaptationsprozeß aufgefaßt werden, der trotz seiner lokalen Begrenztheit nicht auf den Adaptationsort beschränkt bleibt, sondern einen globalen weitreichenden Einfluß auf die Wahrnehmungsschwelle ausübt.

5.3.6.1 Einfluß der retinalen Inhomogenität

Bei den in den Experimenten benutzten retinalen Exzentrizitäten (0.24° - 1.65°) kann die Inhomogenität der Retina nicht generell außer acht gelassen werden. Nur im Bereich schärfsten Sehens, der Foveola (Durchmesser ca. 0.33°), ist der Zapfendurchmesser konstant (minimal ca. $1\mu\text{m}$ ϕ). Die Verteilung

der Zapfen- und Stäbchendetektoren der menschlichen Netzhaut ist aus Bild 5.3.22 zu ersehen.

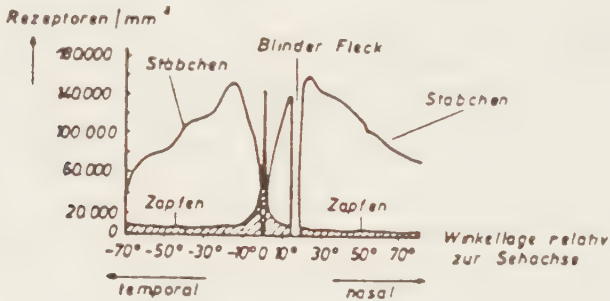


Bild 5.3.22: Verteilung von Zapfen- und Stäbchendetektoren der menschlichen Netzhaut. Aufgetragen sind die Rezeptordichten über den retinalen Exzentrizitäten (nasal, temporal) (nach KORN, 1982).

Für den betrachteten Exzentrizitätsbereich bis ca. 1.65° sei im Folgenden ein lineares Anwachsen der Rezeptordurchmesser bzw. der Rezeptormittelpunktabstände vorausgesetzt. Mit Bild 5.3.23 soll schematisch der Einfluß eines eindimensionalen inhomogenen Rasters auf Objektbewegungen verdeutlicht werden.

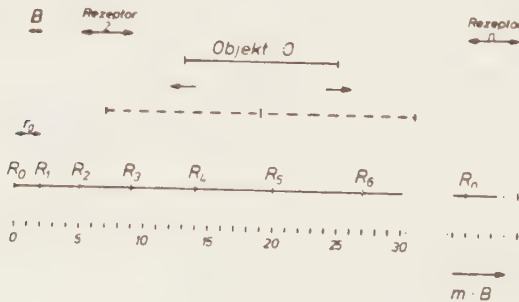


Bild 5.3.23: Verschiebung eines Objekts über ein Detektorraster mit linear anwachsendem Detektordurchmesser. Erläuterungen siehe Text.

Sei mit r_0 der minimale Rezeptordurchmesser und mit B der Zuwachs des Durchmessers bei steigender Exzentrizität bezeichnet. B stellt gleichzeitig die kleinste Rasterung dar. Die Anfangspositionen der Rezeptoren $R_0 \dots R_n$ ergeben sich aus:

$$\begin{aligned}
 R_0 &= 0 \\
 R_1 &= r_0 \\
 R_2 &= R_1 + r_0 + 1 \cdot B \\
 R_3 &= R_2 + r_0 + 2 \cdot B \\
 &\dots\dots\dots \\
 R_n &= R_{n-1} + r_0 + (n-1) \cdot B
 \end{aligned}$$

Der allgemeine Ausdruck für den Ort des n-ten Rezeptors folgt durch Einsetzen des Minimaldurchmessers r_0

$$R_n = n \cdot r_0 + n \cdot (n-1) / 2 \cdot B. \quad (17)$$

Zur Bestimmung der Zahl der durch ein Objekt bedeckten Rezeptoren in Abhängigkeit vom retinalen Ort ist (17) nach n , der Nummer eines Rezeptors, aufzulösen. O_a und O_e bezeichnen den Anfang und das Ende des Objekts. Die Differenz der so berechneten Rezeptornummern liefert die Zahl der betroffenen Detektoren. Also

$$\begin{aligned}
 n(O_e) &= \left[\frac{2 \cdot O_e}{B} + K^2 \right]^{1/2} - K \\
 n(O_a) &= \left[\frac{2 \cdot O_a}{B} + K^2 \right]^{1/2} - K
 \end{aligned} \quad (18)$$

mit

$$K = \frac{2 \cdot r_0 - B}{2 \cdot B}$$

Die Nummern der Rezeptoren wachsen mit der Wurzelfunktion an. Die Konstante K ergibt sich aus dem minimalen Rezeptordurchmesser r_0 und der Rasterelementareinheit B .

Aus Bild 5.3.22 geht hervor, daß die Dichte der Zapfen von etwa 150000 pro mm^2 bei 0° auf 40000 bei 2° abfällt. Der Durchmesser der Zapfen wächst, unter Vernachlässigung der Foveola mit ihrem konstanten Raster, demnach ungefähr von $2.5\mu\text{m}$ auf $5\mu\text{m}$ an, entsprechend 400 und 200 Detektoren pro mm bei Betrachtung von nur einer Dimension. Nimmt man für den Längsdurchmesser des Augapfels (äquivalent des bildseitigen Brennpunktes der Linse) einen mittleren Wert von 24.4 mm an, so entspricht die retinale Exzentrizität von 2° einer Entfernung von $851.1\mu\text{m}$ von der Seehachse ($0.8511 = \sin(2^\circ) \cdot 24.387$). Die Zahl der Detektoren, die in dieser Strecke von $851.1\mu\text{m}$ liegen, berechnet sich unter der Voraussetzung des linearen Anstiegs der Rezeptordurchmesser aus den Dichtewerten (400/mm, 200/mm) zu 255. Setzt man neben dieser Detektoranzahl für den Minimalrezeptordurchmesser r_0 den Wert $2.5\mu\text{m}$ sowie für R_n die $851.1\mu\text{m}$ Exzentrizität in Gleichung (17) ein, so ergibt sich nach dem Auflösen nach B ein Wert von $0.00652\mu\text{m}$ als elementare Rastereinheit. Damit können jetzt über Gleichung (18) die Nummern der Rezeptoren bestimmt werden, die die Objektposition begrenzen. Die Differenz beider Detektornummern liefert die Anzahl der durch ein Objekt mit bestimmter Größe bedeckten Rezeptoren. Die Kurven in Bild 5.3.24 zeigen die Abhängigkeit

der Differenz von der retinalen Exzentrizität bei Objektgrößen von 0.10, 0.25, 0.40, 0.50, 0.75, 1.00.

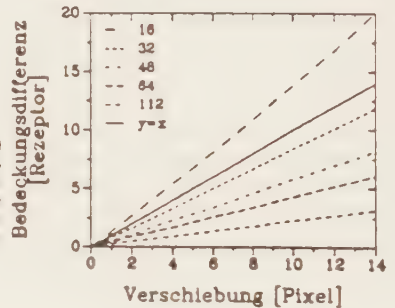
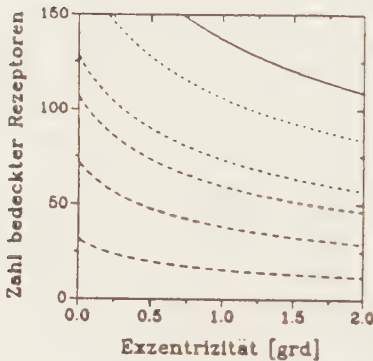


Bild 5.3.24: Abhängigkeit der Anzahl bedeckter Rezeptoren von der retinalen Exzentrizität bei verschiedenen Objektgrößen. Vorausgesetzt sind ein lineares Anwachsen der Rezeptordurchmesser und 400 Detektoren pro mm bei 0°, 200 pro mm bei 2°.

Bild 5.3.25: Differenz der Zahl bedeckter Rezeptoren zwischen Bewegungsstrecken in Richtung und entgegen der Richtung wachsender Rezeptordurchmesser. Die Objektgröße beträgt 0.25°. Die durchgezogene Linie markiert die Gerade $y=x$ (Steigung 1). Parameter ist die Exzentrizität in Pixeleinheiten des Monitors.

Jede Kurve in Bild 5.3.24 ist für eine jeweils feste Objektgröße die Differenz der Gleichungen von (18). Im betroffenen Exzentrizitätsbereich läßt sich hiernach auch bei der im Experiment benutzte Objektgröße 0.25° die Zahl der bedeckten Rezeptoren nicht als konstant voraussetzen. Bild 5.3.25 verdeutlicht die unterschiedlich große Zahl betroffener Rezeptoren. Aufgetragen ist der Unterschied überdeckter Rezeptoren von Bewegungsstrecken in Richtung und gegen die Richtung wachsenden Rezeptordurchmessers. Die Objektgröße stimmt mit der im Experiment überein (0.25°).

Je größer die retinale Exzentrizität, desto größer ist die Differenz der bedeckten Rezeptoren. Der Anstieg erfolgt fast linear und ist bei 16 Pixeln am stärksten. Die Unterschiede in den einzelnen Steigungen werden mit wachsender Exzentrizität immer geringer. Für alle Pixelwerte, die größer als 16 Pixel sind, ist die Steigung kleiner als 1. Nur die Kurve für 16 Pixel oder 0.24° Exzentrizität liegt in Bild 5.3.25 über der Geraden $y = x$.

Die starke Varianz hinsichtlich der Rezeptorenanzahl bei Objektverschiebungen in oder gegen die Richtung steigenden Detektordurchmessers kommt in Bild 5.3.26 besonders deutlich zum Ausdruck. Die Objektgröße ist wieder auf 0.25° festgelegt. Parameter sind die Exzentrizitäten 16 (0.24°) und 112 (1.65°) Pixel.

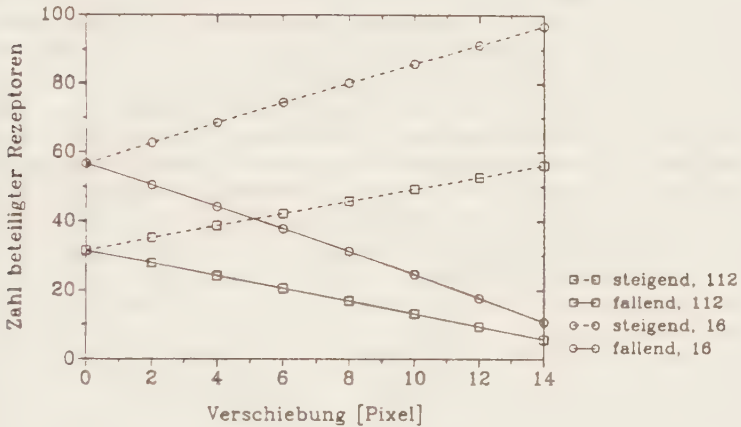


Bild 5.3.26: Zahl der bei einer Objektbewegung in oder gegen die Richtung steigenden Rezeptordurchmessers beteiligten Detektoren. Die Objektgröße ist 0.25° . Die Exzentrizität beträgt 16 und 112 Pixel auf dem Monitor, entsprechend 0.24° und 1.65° . Gestrichelte Linien stehen für Verschiebungen in Richtung steigenden Rezeptordurchmessers, durchgezogene Linien für Verschiebungen in Richtung abnehmenden Durchmessers.

Auch hieraus ist ersichtlich, daß sich bei den im Versuch benutzten Objektgrößen und Exzentrizitäten Unterschiede in den Ergebnissen zeigen müssen. Die Bewegungsrichtungen der einzelnen Verschiebungen sind bezüglich der jeweils betroffenen Rezeptoren nicht gleichberechtigt. Abhängig von der Länge der Verschiebungsstrecke überstreichen Bewegungen in Richtung abnehmenden Rasterdurchmessers nur 80% (bei 2 Pixel Verschiebung) und 10% (bei 14 Pixel Verschiebung) der Detektoren, verglichen mit der Richtung zunehmenden Rezeptordurchmessers (Bild 5.3.26). Mit der Annahme, daß zur Erkennung einer Bewegung eine bestimmte Anzahl von Detektoren während eines festen Zeitintervalls überstrichen werden müssen, folgt, daß die Verschiebungsschwellen hier von der retinalen Exzentrizität, der Verschiebungsstrecke und der Objektgröße abhängen.

5.3.6.2 Geschwindigkeitsabhängigkeit

Die bereits in Vorexperimenten beobachtete Unabhängigkeit der Schwelle von den Testgeschwindigkeiten läßt den Schluß zu, daß die Erkennbarkeitsschwelle von Bewegungen nur von der Summe der überstrichenen Detektoren abhängt, sofern die Zunahme pro Zeiteinheit der Anzahl beteiligter Rezeptoren in bestimmten Grenzen bleibt. Unterhalb dieser Grenze beruht der Prozeß der Erkennung einer Objektbewegung auf der Bestimmung der Verschiebung z.B. durch einen Korrelationsprozeß (vorher - nachher) und nicht auf dem Bewegungseindruck als Ganzem. In allen Experimenten berichteten die Versuchspersonen, daß sie ihre Entscheidung "Bewegung gesehen, Bewegung nicht gesehen" immer auf Grund des Bewegungseindrucks treffen. Bei ganz kleinen Geschwindigkeiten und Bewegungsstrecken ist es natürlich nicht völlig auszuschließen, daß die Objektbewegung trotzdem aus der Positionsveränderung erschlossen wird. Bei sehr kurzen Bewegungszeiten ist nicht die Geschwindigkeit für die Erkennung ausschlaggebend, sondern eine konstante Verschiebung des Objekts. Mit wachsender Bewegungsdauer ist die Erkennung mehr an eine konstante Geschwindigkeit gekoppelt als an die zurückgelegte Wegstrecke (JOHNSON, 1976). Dies deutet sich in den Bildern 5.3.2a) und b) an. Verschiebungen von 2, 4 und 6 Pixeln zeigen kaum Schwankungen in den Antworten, während größere Verschiebungen unterschiedlichere Wahrnehmungshäufigkeiten für die einzelnen Geschwindigkeiten liefern. Dies entspricht den Ergebnissen von (JOHNSON, 1976), wenn man sie auf die hier verwendeten Geschwindigkeiten überträgt.

5.3.6.3 Richtungs- und Abstandsabhängigkeit

Die experimentellen Daten sind in den folgenden Bildern mit der oben beschriebenen Summationsmethode der Antworten "gesehen" verarbeitet worden. Auf der x-Achse ist der Abstand der beiden Objekte in Monitorpixeleinheiten aufgetragen. Daraus läßt sich der Einsatzzeitpunkt der Testobjektverschiebung in Bezug auf den Reiz (Bewegung, Blinken) des induzierenden Objekts nach Formel (9) (Kapitel 5.3) berechnen. Die Abszisse ist also ein Maßstab sowohl für den Abstand der Objekte als auch für den Startzeitpunkt der Testbewegung. Am Ort null findet der Induktionsreiz statt. Die Ordinate der Bilder zeigt die Summe (n) aus Gleichung (15) und ist ein Maß für die Erkennbarkeit der Verschiebungen. Die Fehler der Einzelwerte ergeben sich nach den Fehlerfortpflanzungsregeln bei der Addition der Summanden in Gleichung (15). Der Versuchsperson sind in einer Meßreihe über 8 Verschiebungswerten (0, 2, ..., 14) insgesamt 12 bewußt falsche Antworten zugestanden. Solche Antworten lassen sich beobachten, wenn die Versuchsperson auf Reize schnell reagieren will und eine Antworttaste betätigt, ohne daß das eigentliche Entscheidungskriterium (z.B. gesehen, nicht gesehen) berücksichtigt wird. Die Folge sind unter Umständen Antworten, die die VP selbst als falsch erkennt. Eine Wie-

derholung dieses Testdurchlaufs verbietet sich jedoch aufgrund der jetzt für die VP vorhandenen Vorinformation.

In Bild 5.3.27 sind die Ergebnisse der Kontrollmessung mit einem blinkenden Induktionsobjekt für Testobjektbewegungen nach links, rechts, oben und unten aufgetragen. Die Induktion erfolgt mit einem Objekt im oberen rechten Halbraum (siehe Bild 5.2.1, diagonale Anordnung). Teilbild a) zeigt für Testobjektbewegungen nach links gleichmäßige, etwa 5% niedrigere Erkennbarkeitswerte als für Bewegungen nach rechts. Bis auf den Wert bei Objektort-zeitabstand 128 nehmen die Wahrnehmungsschwellen mit zunehmenden Abständen ab. Beide Resultate - Erkennbarkeit für Bewegungen nach rechts besser als für solche nach links und Abnahme der Erkennbarkeit mit wachsender Exzentrizität - sind ein Indiz für den Einfluß der retinalen Inhomogenität. Auffallend ist allerdings, daß der Ort-zeitabstand 128 immer eine deutlich verbesserte Erkennbarkeit aufweist. Dieser Wert stellt anscheinend ein Optimum für den Testablauf dar. 1.28 Sekunden (128 Pixel / (2 Pixel/20ms)) nach dem Aufblinken des Induktionsobjekts ist die Bewegung des Testobjekts für die Versuchsperson am besten zu erkennen, unabhängig von ihrer Bewegungsrichtung.

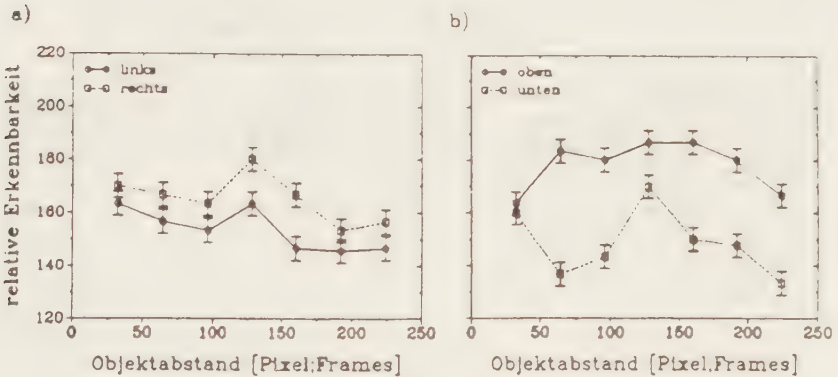


Bild 5.3.27: Relative Erkennbarkeit der Testobjektbewegung bei variablem Objektort-zeitabstand. Induktion durch aufblinkendes Objekt im rechten oberen Halbraum. VP = KG.

a) Kreise: Bewegungen nach links, Quadrate: nach rechts
b) Kreise: Bewegungen nach oben, Quadrate: nach unten

Nur die Bewegungsrichtung nach unten zeigt in Bild 5.3.27 b) einen ähnlichen Verlauf wie die horizontalen Richtungen. Es ist ein ausgeprägtes Minimum (Abstand 64) und Maximum (Abstand 128) vorhanden. Die Erkennbarkeit bei 128 liegt etwa zwischen der von Bewegungen nach rechts und links, alle anderen Schwellenwerte sind niedriger. Die Kurve für Bewegungen nach oben hat mehr einen parabelförmigen Verlauf, der aber auch beim Abstand 128 sein

Maximum besitzt. Im Vergleich aller Richtungen können Bewegungen nach oben am leichtesten erkannt werden. Die deutlich größeren Differenzen zwischen den Kurven für oben und unten als für rechts und links könnten auf Rezeptordichteunterschiede in horizontaler und vertikaler Retinarichtung hinweisen.

Die Interpretation der Richtungsunterschiede mittels retinaler Inhomogenität sollte jedoch nicht überstrapaziert werden. Ungenauigkeiten bei der Fixation durch das achromatisierende Fernrohr würden auf ähnliche Differenzen von "links/rechts"- und "oben/unten"-Bewegungen führen. Ein Abweichen von der optischen Achse des Fernrohrs läßt die Linsenfehler stark ansteigen und erzeugt am Rande eine unscharfe Abbildung, die sich natürlich sofort auf die Erkennbarkeit auswirkt. Die vor jeder experimentellen Sitzung nötige neue Justierung des Fernrohrs durch die Versuchsperson lieferte Einstellungswerte mit hohen Streuungen.

Außer Zweifel steht jedoch die Tatsache, daß mit Einführung der Induktionsbewegung die Richtungsabhängigkeiten merklich zurückgehen. Der Prozeß einer Induktion überschreibt hier die im visuellen System eventuell vorhandene oder von außen künstlich erzeugten Richtungscharakteristiken einer Nullmessung.

Hauptanliegen des Verschiebungsschwellenexperiments ist die Untersuchung des Einflusses der Induktion auf das Testobjekt, so daß hier die Richtungsabhängigkeit im Kontrollexperiment nicht von entscheidender Bedeutung ist. Bild 5.3.28 zeigt die Kurven für Testobjektbewegungen nach links (Kreise) und rechts (Quadrate) bei einer Induktionsbewegung nach rechts durch ein Objekt im rechten oberen Halbraum.

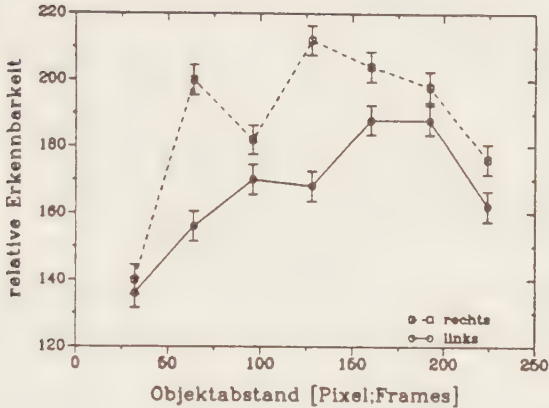
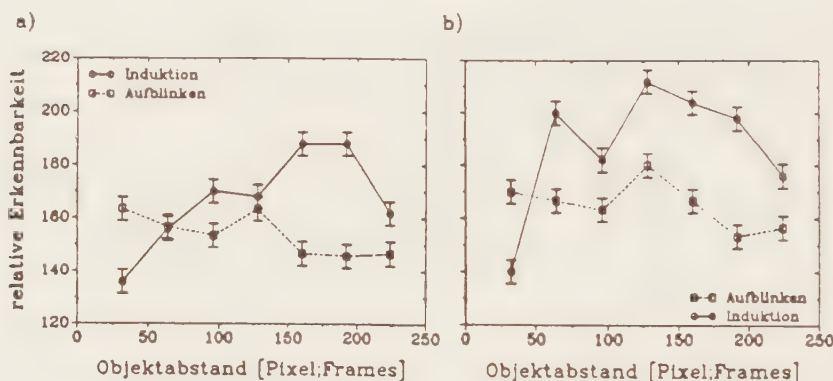


Bild 5.3.28: Relative Erkennbarkeit der Testobjektbewegung bei variablem Objektort- zeitabstand. Induktion durch ein Objekt im rechten oberen Halbraum mit Bewegung nach rechts. Kreise: Testobjektbewegung nach links (gegensinnig), Quadrate: Bewegung nach rechts (gleichsinnig). VP = KG.

Im Vergleich zur Kontrollmessung ist hier die Differenz zwischen Bewegungen nach links und nach rechts noch größer. Das zeigt, daß neben der generellen Erhöhung der Empfindlichkeit bei der Testbewegung auch durch die Induktionsbewegungsrichtung eine Schwellenerniedrigung eintritt. In Bild 5.3.29 sind die Messungen mit blinkendem (quadratische Symbole) bzw. sich nach rechts bewegendem Induktionsobjekt (Kreissymbole) getrennt nach den Bewegungsrichtungen links/rechts des Testobjekts zusammengefaßt. Es fällt auf, daß beim Ort- Zeitabstand 32 im Vergleich zum Kontrollversuch eine Schwellenerhöhung entsteht. Der Einfluß der Bewegungsinduktion behindert zunächst die Wahrnehmung der Testobjektbewegung. Für Bewegungen nach rechts liegt die Erkennbarkeit zuerst ca. 18% unter dem Wert der Blinkinduktion, dann bei Abstand 64 wieder 18% darüber. Beide Bewegungsrichtungen erfahren durch die Induktionsbewegung eine maximale Schwellenerniedrigung von etwa 20% beim Abstandswert 192. Die Induktionswirkung kommt also bei 2.8° Abstand der Objekte, entsprechend 1.9 Sekunden nach der Induktion, am stärksten zum Tragen. Danach ist ein rapider Abfall zu beobachten.



*Bild 5.3.29: Relative Erkennbarkeit der Testobjektbewegung bei variablem Objektort- zeitabstand. Vergleich der Induktionsreize. Kreise: Induktion durch Objektbewegung nach rechts. Quadrate: Induktion durch blinkendes Objekt. Induktionsobjekt im rechten oberen Halbraum. VP = KG.
a) Testobjektbewegung nach rechts
b) Testobjektbewegung nach links*

Die unterschiedliche Verarbeitung der Richtungen links und rechts dokumentiert sich auch, wenn man aus den Meßdaten die durch nichtlineare Regression ermittelten p_3 -Werte (siehe Auswertemethoden Kapitel 5.3.5) über den Abständen aufträgt. Die Größe p_3 ist ein Maß für die Schärfe der zugrunde liegenden Gaußfunktion und damit auch der psychophysikalischen Genauigkeit der Messung. Eine große Steigung der S-Kurve bei 50% bedeutet, daß über eine enge Gaußkurve integriert wurde. Aus Bild 5.3.30 geht hervor, daß die p_3 -Werte für eine Testbewegung nach links nach einem Einschwingvorgang konstant um den Wert 1.7 pendeln. Dagegen unterliegen Bewegungen nach rechts großen Schwankungen, die auf die Unsicherheit beim Übergang von 0 auf 100% Antworten "gesehen" hindeuten. Die Spline-Interpolation der Punkte unterstreicht noch das resonanzartige Schwingen der p_3 -Werte für Bewegungen nach rechts mit einer Periode von 60-70 Pixel. Die Sonderstellung des Abstands 32 tritt auch hier durch die größten p_3 -Werte signifikant hervor.

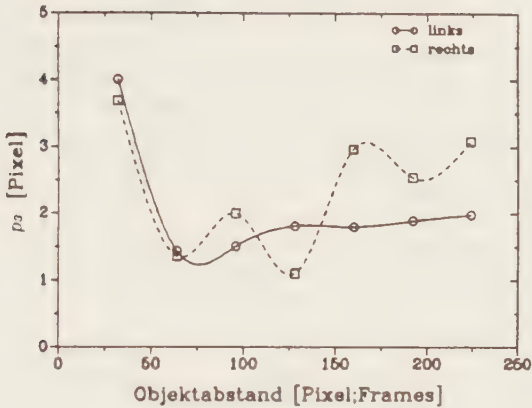


Bild 5.3.30: Parameter p_3 aus der Auswertung mit der nichtlinearen Regression bei verschiedenen Objektabständen. Spline-Interpolation der Punkte. Gestrichelte Linie: Testobjektbewegung nach rechts, durchgezogene Linie: Testobjektbewegung nach links. Induktion durch Objekt im rechten oberen Halbraum mit Bewegung nach rechts.

5.3.7 Zusammenfassung und Folgerungen für weitere Experimente

Aus dem Verschiebungsschwellenexperiment geht eindeutig hervor, daß im Gegensatz zu einem Adaptationsprozeß (VEY, 1984; RÖHLER, 1985) eine örtlich und zeitlich weitreichende Beeinflussung bewegter Objekte durch Bewegungen möglich ist. Die Reichweite beträgt unter diesen experimentellen Bedingungen etwa das 15-fache der Induktionsbewegung. Die maximal erzielbare Erhöhung der Erkennbarkeit kann eine Induktion ohne Bewegungsreiz um 20% übersteigen. Läßt man die Abweichungen beim Abstandswert 128 außer acht, so kann man einen prinzipiellen Verlauf der Erkennbarkeit einer Bewegung in Abhängigkeit vom zeitlichem und örtlichem Abstand des Induktionsreizes nach Bild 5.3.31 beobachten.



Bild 5.3.31: Schematische Darstellung der Erkennbarkeit einer Bewegung bei verschiedenen zeitlichen und örtlichen Abständen vom Induktionsreiz. Gestrichelte Kurve: Induktionsblinkreiz, durchgezogene Kurve: Induktionsbewegungsreiz.

Mit dem Verschiebungsschwellenexperiment kann also ein Transfer der Bewegungsinformation nachgewiesen werden. Im Gegensatz zur Lokaladaptation ist die mit diesem Versuch isolierte Form der Bewegungswahrnehmung ein deutlich globalerer Prozeß, der demzufolge auch in höheren Verarbeitungsstufen stattfindet. Nach der Erkennung und Verarbeitung der Induktionsbewegung ist es dem System möglich, weitere Bewegungen schon aus kleineren Objektverschiebungen wahrzunehmen, wobei mit der Induktion gleichgerichtete Bewegungen nochmals bevorzugt werden. Nachdem das Maximum der Erkennbarkeit erreicht ist, reduziert sich der Effekt wieder auf das Niveau einer einfachen Bewegungswahrnehmung.

Die Methode der Verschiebungsschwellenmessung arbeitet hier nahe an den Auflösungsgrenzen des Farbmustergenerators. Die Versuchsperson kann schon nach einer Objektverschiebung von 2-6 Pixel 50-100% Antworten "gesehen" erreichen. Erhöht man jetzt noch die Geschwindigkeit von den benutzten 2 Pixel pro 20ms auf z.B. 3 oder 4 Pixel pro 20ms, so ist die Objektbewegung bereits bei einer Verschiebung von 3 oder 4 Pixel mit annähernd 100% zu sehen. Hinzu kommt noch, daß man bei diesen Verschiebungen und Geschwindigkeiten eigentlich nicht mehr von einer konstanten stetigen Bewegung sprechen kann. Die Bestimmung der Abhängigkeiten der Schwellen von Gleichung (9) ist dann mehr als fraglich.

Eine Lösung wäre die Vergrößerung des Abstandes Monitor-Versuchsperson. Dies ist aber auf Grund der räumlichen Gegebenheiten nicht möglich und hätte außerdem eine Verringerung der effektiven Feldgröße zur Folge;

das Umfeld als Referenzgebiet mit Bezugsobjekten spielt bei der Bewegungserkennung nachweislich eine nicht zu vernachlässigende Rolle (JOHNSON, 1982; MORI 1984). Ein experimenteller Aufbau, der die Umfeldgrößen standardisiert, befindet sich zur Zeit in der Erprobungsphase (ARNSTEIN, 1987; MEYER, 1987). Damit können dann das FMG-Bild und ein homogenes Umfeld von hinten auf eine Leinwand projiziert werden. Der Versuchsperson bietet sich in 4 Metern Abstand vor der Leinwand ein Gesamtfeld der Größe 28"x21" dar. Das eingeblendete FMG-Bild ist dann 5"x5" groß.

Eine weiterführende Analyse des Induktionseinflusses basiert im folgenden auf der Messung von Reaktionszeiten der Versuchsperson, da dann die experimentell bedingten Auflösungsgrenzen nur noch eine untergeordnete Rolle spielen.

Alle Resultate sind mit einer starren Beziehung zwischen dem Orts- und Zeitabstand, entsprechend der Bewegungsgeschwindigkeit, erzielt worden. Es stellt sich nun die Frage, inwieweit dies zur Ausbreitung der Bewegungsinformation wichtig ist (siehe die Experimente in Kapitel 5.4.1 und 5.4.2).

Die große Anzahl an notwendigen Einzeltests läßt sich auch nicht durch den Einsatz von Staircase Verfahren (CORNSEWET, 1962) zur Schwellenbestimmung reduzieren, da hierbei die Auflösungsgrenze noch stärker ins Gewicht fällt. Es sind ja nur eine bis drei Verschiebungen möglich mit denen Staircase-Iterationen durchgeführt werden können. Der zeitliche Aufwand für die Versuchsperson, 50 Antworten pro Verschiebungswert zu geben, lohnt sich, da in Verbindung mit dem vorgestellten Summationsauswerteverfahren ein Induktionseinfluß eindeutig nachgewiesen und Parameterabhängigkeiten aufgezeigt werden können.

5.4 Reaktionszeitmessung

Die Bestimmung von Reaktionszeiten einer Versuchsperson als Meßmethode bietet gegenüber Verschiebungsschwellen neben der schon erwähnten Umgehung der Auflösungsbegrenzung des FMGs noch weitere Vorteile. Sie ist wohl mit das Einfachste aller Meßverfahren bei der eine Versuchsperson aktiv auf Testreize antworten muß. Es wird nur die schnelle Reaktion auf einen Reiz verlangt und keine Entscheidung, die immer mit der Gefahr verbunden ist, daß die VP ihr Antwortkriterium während der Testdurchläufe ändert. Die Sensibilisierung der VP ist einfacher und zielgerichteter und sollte dadurch auch im Hinblick auf Reproduzierbarkeit zuverlässiger als Verschiebungsschwellenmessungen sein. Der Entscheidungsprozeß muß nicht auf mehrere mögliche Antwortalternativen gleichmäßig übertragen werden und ist somit bei zeitlich längeren Versuchsreihen einfacher konstant zu halten.

Reaktionen auf sensorische Informationen zu erzeugen ist die erste von der Evolution hervorgebrachte Verarbeitungsart. Frühe Entwicklungsstufen hatten nachweislich eine schlechte Ortsauflösung (GEIGER, 1983). Daran an-

schließlich sind zur weiteren Analyse Detektoren mit höherer Auflösung hervorgebracht worden. Im Gegensatz zu Reaktionszeitmessungen sind Verschiebungsschwellen stark von einer guten Detektorauflösung abhängig. Bei Reaktionszeiten tritt ein über das Raster integrierender Charakter des visuellen Systems hervor. Reaktionszeitmessungen basieren auf den ursprünglichsten Aufgaben von neuronalen Netzwerken.

Eine Auswertung der Reaktionszeitmessungen erfolgt direkt in Form von Histogrammen oder durch einfache arithmetische Mittelung über alle Testreihen mit gleicher Parameterkonstellation. Eine angepaßte Normierung der Meßwerte erlaubt es auch, Ergebnisse, die über einen längeren Zeitraum (mehrere Tage) gewonnen wurden, besser miteinander zu vergleichen als es (VEY 1984, S.122ff) mit dem Staircase-Meßverfahren möglich ist.

5.4.1 Messung mit zwei Objekten

Mit einem nahezu identischen Versuchsaufbau wie im Verschiebungsschwellenexperiment soll der Einfluß eines induzierenden Objekts auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts ermittelt, sowie Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen beiden Meßverfahren aufgedeckt werden. Weiter wird die Abhängigkeit der Reaktionszeiten auf die einsetzende Testobjektbewegung relativ zum Zeitpunkt des Induktionsreizes untersucht.

5.4.1.1 Versuchsdurchführung und Versuchsablauf

Die Versuchsanordnung und die dazugehörigen Parameter unterscheiden sich nur geringfügig von denen des Verschiebungsschwellenexperiments in Bild 5.2.1. Die induzierende Bewegung wird durch das Objekt im linken unteren Halbraum ausgelöst. Die Bewegungsrichtungen liegen längs der Diagonalen zum Fixationspunkt. Das Testobjekt bewegt sich in Richtung der in Bild 5.4.1 eingezeichneten Pfeile. Alle Richtungskombinationen werden der Versuchsperson in zufälliger Reihenfolge dargeboten.

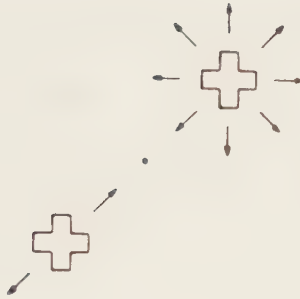


Bild 5.4.1: Versuchsanordnung beim Reaktionszeitexperiment. Pfeile symbolisieren die möglichen Bewegungsrichtungen. Das induzierende Objekt befindet sich unterhalb des Fixationspunktes.

Grundeinstellung der Parameter:

Feldgröße	: 4.6° x 3.5°
Objektgröße	: 0.25°
Abstand der Objekte	: 0.4°, 0.8°, 1.2°, 2.0°
Geschwindigkeiten	: 0.6°/s...3.5°/s
Bewegungsstrecke	: 0.4°(Induktion), 0.5°(Test)
Bewegungsdauer Induktion	: 160ms, 320ms, 640ms
Bewegungsdauer Test	: 400ms (Maximum)
Kontrast zum Hintergrund	: 40%
Hintergrundleuchtdichte	: 12.5 cd./m ²
Objektfarbe	: weiß

Unterschiede zum Verschiebungsexperiment liegen vor allem im veränderten Abstand der Objekte, der dabei zurückgelegten Strecke und der Bewegungsdauer.

Den Versuchsablauf zeigt Bild 5.4.2. Er ist ebenfalls in Analogie zum Verschiebungsexperiment gehalten, jedoch existiert hier keine feste Zeitbeziehung zwischen Induktions- und Testobjektbewegung. Der Startzeitpunkt der Testbewegung kann in einem der Bereiche I, II, oder III liegen. Bereich I steht für Start der Testobjektbewegung vor, II für während und III für nach dem Beginn der Induktion. Die Aufgabe der Versuchsperson besteht darin, möglichst schnell auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts zu reagieren und eine Taste des intelligenten Versuchsinterface (IVI) mit dem Zeigefinger niederzudrücken. Das Versuchsprogramm initialisiert die Taste und liest nach dem Ende einer Sequenz die Zeit t_R ein. Die Reaktionszeit ergibt sich aus der Differenz $t_R - t_{1a}$. Zur Mittelwertbildung werden für jede Parameterkonstellation, je nach Versuchsparameter, etwa 50-150 Einzelwerte herangezogen, wobei schon während des Versuchs Reaktionszeiten, die außerhalb des Zeitintervalls [150ms, 450ms] liegen, nicht zur Zahl der zulässigen Werte beitragen. Die untere Intervallgrenze steht für die minimale Ausführungszeit bestehend aus Nervenleitungsvorgängen und der Motorik zum Betätigen der Reaktionszeit Taste.

Eine Überschreitung des oberen Grenzwerts zeigt, daß die VP nicht die zum Experiment nötige Konzentration aufbringt. Gleichzeitig zum Tastendruck werden auch die beiden Objekte ausgeblendet und auf dem Monitor ist nur noch der Fixationspunkt zu sehen. Auch in diesem Experiment werden mit einer Wahrscheinlichkeit von 20% Blanktests eingefügt, die nach der Induktion keine Testobjektbewegung besitzen. Damit wird die Aufmerksamkeit der Versuchsperson gefestigt, und der durch monotonen Antworten entstehende Rhythmus des Tastendrucks zerstört. Außerdem kann man nicht mehr mit Gewißheit sagen, daß jeder Induktion irgendwann ein Test folgen muß und ein im passenden Zeitintervall liegender Tastendruck die Meßaufgabe löst. Nach dem Blanktest folgt ohne Rücksicht auf die Bedienung einer Taste der nächste Testdurchgang.

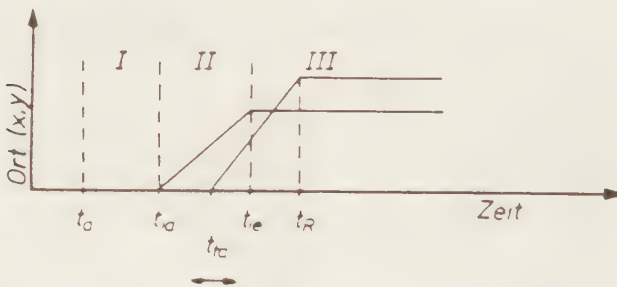


Bild 5.4.2: Ort- Zeitdiagramm des Reaktionszeitexperiments.

Startzeitpunkt Test	: t_a
Start induzierende Bewegung	: t_{i0}
Ende induzierende Bewegung	: t_{ie}
Start Testbewegung	: t_{ia} (variabel)
Ende Testbewegung	: t_R
Zeitabstand der Objekte	: $t_{ia} - t_{i0}$
Start der Testbewegung vor der Induktion	
Bereich I	: $t_{ia} \in [t_a, t_{i0}]$
Start der Testbewegung während der Induktion	
Bereich II	: $t_{ia} \in [t_{i0}, t_{ie}]$
Start der Testbewegung nach der Induktion	
Bereich III	: $t_{ia} \in [t_{ie}, t_R]$
Reaktionszeit auf	
einsetzende Testbewegung	: $t_R - t_{ia}$
Ende des Tests	: t_R

Die Auswertung von Versuchen mit zufällig verteiltem Startzeitpunkt des Testobjekts macht sich die geringen Schwankungen der Antwortzeiten innerhalb weniger Monitorbilder zunutze. In der Regel werden jeweils 5 Bilder zusammengefaßt ($5 \cdot 20\text{ms} = 100\text{ms}$) und der Mittelwert der Reaktionszeiten innerhalb dieses Zeitintervalls berechnet. In den Diagrammen wird jeweils in der Mitte eines jeden 100ms Intervalls der Wert eingetragen. Variationen der Intervallbreite zwischen 2 und 8 Bildern zeigen nur geringe Auswirkungen auf

den Verlauf der Meßkurven. Auch die Schwankungen der Mittelwerte werden kaum beeinflusst.

5.4.1.2 Richtungsabhängigkeit

Die Richtungsabhängigkeit von Reaktionszeiten auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts bei festem Abstand beider Objekte zeigt für zwei Versuchspersonen Bild 5.4.3. Die Richtungen sind so festgelegt, daß 0° einer Bewegung nach rechts, 45° einer nach schräg rechts oben, usw., entsprechen. Die Geschwindigkeiten der Induktionsbewegung betragen 1 oder 4 Pixel pro 20ms in Richtung 225°. Die Testgeschwindigkeit beträgt in allen Fällen 2 Pixel pro 20ms. Da die Verschiebung der Objekte nur in einem diskreten Pixelraster möglich ist, besitzen, bei gleicher Anzahl von Verschiebungspixeln je Zeiteinheit, Bewegungen in Richtung der Diagonalen, aufgrund der größeren zurückgelegten Wegstrecke, eine um den Faktor $\sqrt{2}$ höhere Geschwindigkeiten als horizontale und vertikale Richtungen.

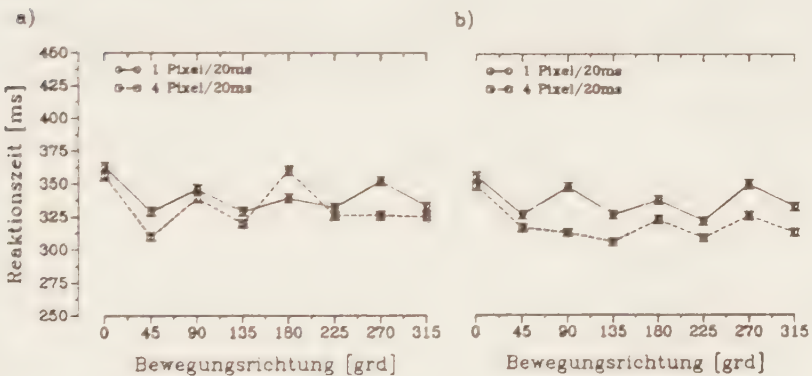


Bild 5.4.3: Abhängigkeit der mittleren Reaktionszeit auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts von der Bewegungsrichtung. Kreise: induzierende Geschwindigkeit 1 Pixel/20ms (0.7°/s), Quadrate: induzierende Geschwindigkeit 4 Pixel/20ms (2.9°/s). Testobjektgeschwindigkeit 2 Pixel/20ms (1.4° oder 2° je nach Richtung, diagonal, vertikal / horizontal). 0° entspricht Bewegung nach rechts, 45° Bewegung nach schräg rechts oben, usw.... Abstand der Objekte ca. 2.3°. Induzierende Bewegung vom Objekt im linken unteren Halbraum in Richtung 225°. Testobjekt oben rechts.

a) VP = TS

b) VP = KG

Das induzierende Objekt bewegt sich in Richtung 225°, befindet sich im linken unteren Halbraum und ist ca. 1.1° vom Fixationspunkt entfernt. Alle Testobjektbewegungen starten 2240ms (560ms) nach Beginn und 1600ms

(400ms) nach Ende der induzierenden Bewegung ($t_{1a}-t_{1a}$ in Bild 5.4.2), deren Geschwindigkeit 0.7°/s (2.9°/s) beträgt.

Die Unterschiede in den induzierenden Geschwindigkeiten treten in Bild 5.4.3 deutlich hervor; besonders bei Versuchsperson KG. Langsame Induktionsbewegungen lassen den Bewegungsstart des Testobjekts schlechter erkennen und benötigen höhere Reaktionszeiten. Die Geschwindigkeitsdifferenzen, die in den diagonalen und vertikal horizontalen Richtungen begründet liegen, sind ebenfalls nachweisbar. Größere Verschiebungsgeschwindigkeiten bei 45°, 135°, 225° und 315° besitzen bei beiden Versuchspersonen kürzere Reaktionszeiten. Der Unterschied beträgt im Mittel jeweils ca. 20-40ms. Ein Einfluß der induzierenden Bewegungsrichtung (225°) ist nicht nachzuweisen. Es zeigt sich beim Wert 225° weder eine signifikante Erhöhung noch Erniedrigung der Reaktionszeiten.

Der folgende Versuch testet den Einfluß des Abstandes der Objekte auf die Reaktionszeiten. Im Gegensatz zu oben ist jetzt die Induzierende Geschwindigkeit mit 2 Pixeln pro 20ms (1.4°/s) gleich der Testgeschwindigkeit, und der Objektabstand kann die Werte 0.4°, 0.9° und 1.4° annehmen. Die Größe ($t_{1a}-t_{1a}$) (siehe Bild 5.4.2) variiert mit dem Abstand von 320ms bei 0.4° über 640ms bei 0.9° bis zu 960ms bei 1.4°. Bild 5.4.4 zeigt die Ergebnisse für die Versuchsperson TS.

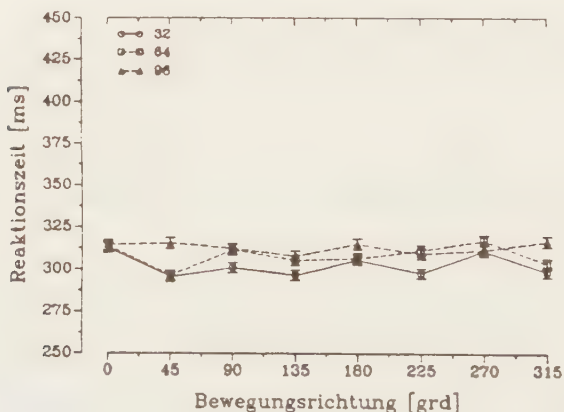


Bild 5.4.4: Mittlere Reaktionszeit auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts in Abhängigkeit von der Bewegungsrichtung bei verschiedenen Objektabständen. Kreise: 0.4° Objektabstand, Quadrate: 0.9°, Dreiecke: 1.4°. Geschwindigkeit: Induktions- und Testobjekt 2 Pixel/20ms. VP = TS. Restliche Parameter wie in Bild 5.4.3.

Alle Reaktionszeiten bewegen sich in einem Bereich von 295–315ms. Der geringste Abstand der Objekte (0.4°) besitzt die kürzesten Reaktionszeiten und setzen sich kaum von den Abständen 0.9° und 1.4° ab. Die Unterschiede in den Geschwindigkeitswerten für diagonale und vertikal / horizontale Bewegungsrichtungen sind hier, wenn auch in reduzierter Form, zu erkennen.

Der nächste Schritt zur Untersuchung der Wechselwirkung zwischen beiden Objekten wird im folgenden Versuch vollzogen. Es werden die Reaktionszeitunterschiede in den in Bild 5.4.2 definierten Bereichen I, II und III miteinander verglichen. Im Experiment wird mit einer zufälligen Mischung aus den induzierenden Bewegungsrichtungen 45° und 225° die Richtungsabhängigkeit der Testobjektbewegung geprüft. Der Bewegungsstartzeitpunkt des Testobjekts liegt für jeden Testdurchlauf zufällig in den drei möglichen Bereichen. Der Objektabstand ist konstant und beträgt ca. 2.3° . Die verschiedenen Geschwindigkeiten, die durch die Bewegungsrichtungen diagonal oder vertikal / horizontal aufgrund der Rasterung im Farbmustergenerator entstehen, lassen sich bei Pixelverschiebungen von 2 für diagonal und 3 für vertikal / horizontal in etwa ausgleichen. Der Fehler in den Geschwindigkeiten beträgt dann nur noch ca. 6%. Dies entspricht bei einer Bewegungsgeschwindigkeit von $2^\circ/\text{s}$ $0.12^\circ/\text{s}$. Diese Differenz kann bei der verwendeten Versuchsanordnung vernachlässigt werden.

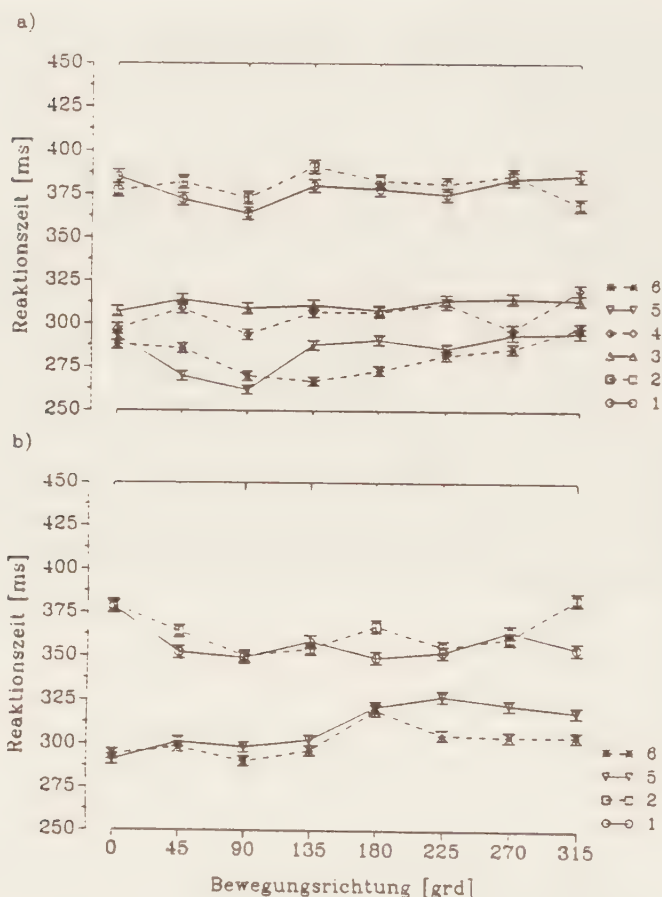


Bild 5.4.5: Abhängigkeit der mittleren Reaktionszeit auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts bei zufälligen Startzeitpunkten der Testobjektbewegungsrichtung. Zufällige Mischung der Induktionsrichtungen 45° und 225° . Abstand der Objekte 2.3° , Geschwindigkeit $2^\circ/\text{s}$. Restliche Parameter wie in Bild 5.4.3. Teilbild a) VP = KG, Teilbild b) VP = ES, hier sind keine Messungen im Bereich II erfolgt.

Legende:

- 1) Test vor Induktion (Bereich I), Induktionsrichtung 45°
- 2) Test vor Induktion (Bereich I), Induktionsrichtung 225°
- 3) Test während Induktion (Bereich II), Induktionsrichtung 45°
- 4) Test während Induktion (Bereich II), Induktionsrichtung 225°
- 5) Test nach Induktion (Bereich III), Induktionsrichtung 45°
- 6) Test nach Induktion (Bereich III), Induktionsrichtung 225°

In beiden Bildern (Bild 5.4.5 a), b)) fällt auf, daß die Differenz der Reaktionszeiten für die Testzeitpunkte Vor- und Nach- Induktionsbewegungen groß ist, gegenüber den Schwankungen, die aus den unterschiedlichen Bewegungsrichtungen resultieren. Beide Versuchspersonen zeigen durch die Induktionsbewegung eine um maximal ca. 75ms niedrigere Reaktionszeit. Die Differenz ist bei ES, falls die Induktionsbewegung in Richtung 45° erfolgt, etwas geringer bei den Testrichtungen 180° – 315° . Die Variation mit der Richtung vergrößert sich bei einsetzender Induktionsbewegung. Vor der Induktion lassen sich im Rahmen der Fehler kaum Unterschiede ausmachen. Erst wenn der Startzeitpunkt des Testobjekts in den Bereich III fällt, treten größere Reaktionszeitschwankungen mit den Richtungen auf (VP KG). Bei ES sind alle Reaktionszeiten, die im Bereich II und III liegen, zusammengefaßt, so daß dieser Effekt hier nicht so stark in Erscheinung tritt. Auffallend ist nur, daß die Testrichtungen, die mit der Induktion übereinstimmen, keine gleichmäßige Behandlung erfahren. Bei KG zeigt sich bei 45° eine Aufspaltung zwischen einer Induktion in Richtung 45° oder 225° , bei ES ist das bei 225° zu sehen. In beiden Fällen findet eine Bevorzugung der Induktionsrichtung statt.

In einem weiteren Versuch soll neben der lokalisierten Induktionsbewegung eine zusätzliche globale Bewegung dem Testfeld überlagert werden, damit Wechselwirkungen zwischen lokaler und globaler Bewegungsinformation beobachtet werden können. Den globalen Bewegungseindruck erzeugt im Experiment ein vertikales Hintergrundrechteckgitter mit einer Ortsfrequenz von 4 Perioden pro Grad, das das gesamte Monitorfeld bedeckt. Der Kontrast des Gitters beträgt 70% des Objektkontrastes. Es bewegt sich während eines Testdurchlaufs mit $1.4^\circ/\text{s}$ nach rechts (0°) oder links (180°). Seine Bewegungsrichtung variiert zufällig von Test zu Test. Das bewegte Gitter wird bereits eine Sekunde vor dem Zeitpunkt t_a (siehe Bild 5.4.2) ein- und bei t_a ausgeblendet. Die Ein- und Ausschaltvorgänge verändern den Gitterkontrast jeweils nach einer zeitlichen Gaußflanke mit einer Halbwertsbreite von ca. 0.2 Sekunden. Dadurch gelingt die Verhinderung von störenden Einschwingvorgängen, die beim plötzlichen Auftauchen von kontrastreichen, bewegten Objekten entstehen können. Die weiteren Versuchsparameter stimmen mit Bild 5.4.5 überein. Bild 5.4.6 zeigt die Meßergebnisse, aufgespalten nach Induktions- und Bewegungsrichtungen des Hintergrundgitters.

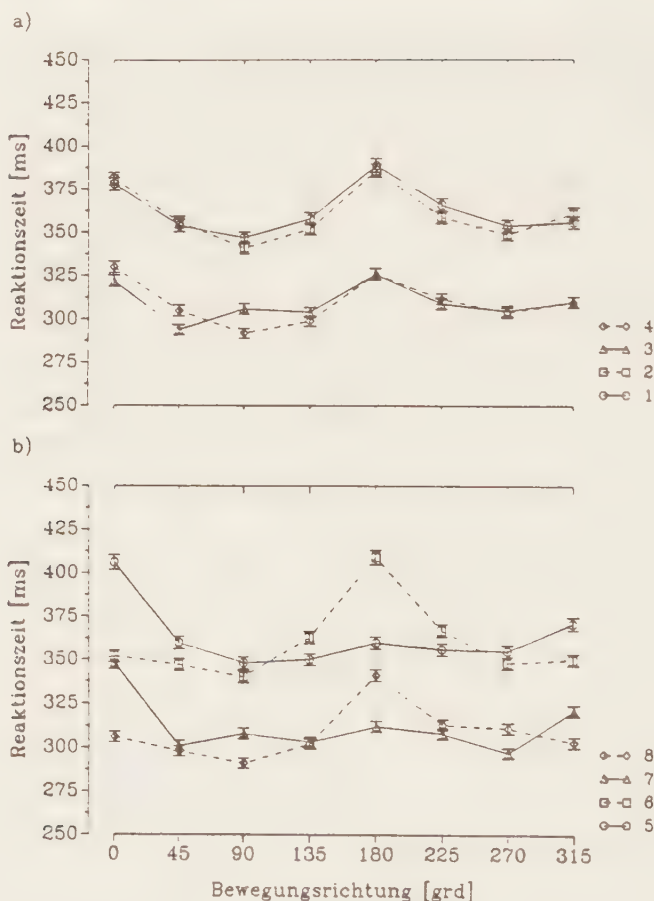


Bild 5.4.6: Mittlere Reaktionszeit auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts bei zufälligem Startzeitpunkt der Testobjektbewegungsrichtung bei Hintergrundbewegung. Zufällige Mischung der Induktionsrichtungen 45° und 225° und der Bewegungsrichtungen des Hintergrundgitters. Abstand der Objekte 2.3°, Geschwindigkeit 2°/s. VP = KG.

Hintergrundgitter:

Ortsfrequenz	: 4 Perioden pro Grad
Kontrast	: 70% des Objektkontrasts
Geschwindigkeit	: 1.4°/s
Bewegungsrichtung	: 0°(nach rechts), 180°(nach links)
Form	: Rechteckfunktion
Orientierung	: vertikal

Restliche Parameter wie in Bild 5.4.3.

Teilbild a): Hintergrundgitterbewegungsrichtungen 0° und 180°

- 1) Test vor Induktion (Bereich I), Induktionsrichtung 45°
- 2) Test vor Induktion (Bereich I), Induktionsrichtung 225°
- 3) Test nach Induktion (Bereich III), Induktionsrichtung 45°
- 4) Test nach Induktion (Bereich III), Induktionsrichtung 225°

Teilbild b): Induktionsbewegungsrichtungen 45° und 225°

5) Test vor Induktion, Gitterbewegungsrichtung 0°

6) Test vor Induktion, Gitterbewegungsrichtung 180°

7) Test nach Induktion, Gitterbewegungsrichtung 0°

8) Test nach Induktion, Gitterbewegungsrichtung 180°

Die Existenz einer richtungsabhängigen Bewegung läßt sich jetzt in den Diagrammen sofort erkennen. In Bild 5.4.6a) sind Testobjektbewegungen in Richtung 0° und 180° schwieriger zu erkennen und die Reaktionszeiten entsprechend höher. Die Richtungen 90° und 270° zeigen keine Veränderung, während sich bei 45°, 135°, 225° und 315° ein Zwischenwert einstellt. Unterschiede in den beiden Induktionsrichtungen sind nicht festzustellen. Hingegen tritt deutlich der generelle Einfluß der Induktion zu Tage: Die Reaktionszeiten nach der induzierenden Bewegung erniedrigen sich um etwa 50ms, unabhängig von den Bewegungsrichtungen.

Die Auftrennung nach den Hintergrundbewegungsrichtungen 0° und 180° ist in Bild 5.4.6 b) durchgeführt. Alle Kurven besitzen ihr Maxima an den Positionen der Hintergrundrichtungen. Andere Richtungen bleiben unbeeinflußt. Die Wirkung der Bewegung des Hintergrunds macht sich sogar so stark bemerkbar, daß der Induktionseinfluß bei 0° und 180° beinahe aufgehoben wird. Bei 0° berühren sich die Kurven für Tests vor der Induktion mit Hintergrundbewegung nach rechts (Quadrate, gestrichelte Kurve) und nach der Induktion mit Hintergrundbewegung nach links (Dreieck, durchgezogene Kurve). Für jede Bewegung des Hintergrundes bleibt aber die Differenz der Reaktionszeiten für vor und nach der Induktion von ca. 50ms erhalten.

Als letzten Versuch zur Abhängigkeit der Bewegungsrichtungen sind in Bild 5.4.7 noch die Daten eines Kontrollversuchs aufgezeichnet. Ein zu den obigen Experimenten (siehe Bild 5.4.5) identischer Versuchsablauf gewährleistet die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Die einzige Änderung besteht im Ersetzen der induzierenden Bewegung durch ein Aufblinken des Objekts zum Startzeitpunkt der Induktion.

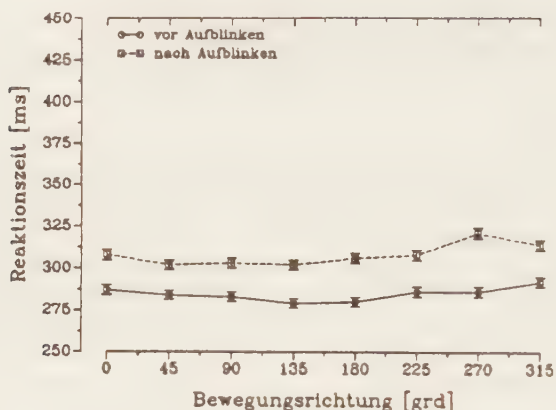


Bild 5.4.7: Mittlere Reaktionszeit auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts bei zufälligem Startzeitpunkt der Testobjektbewegung. Die induzierende Bewegung ist ersetzt durch ein Aufblinken des Objekts zur Startzeit der Induktion. Abstand der Objekte 2.3°. Geschwindigkeit 2°/s. Restliche Parameter wie in Bild 5.4.5. VP = KG

Auch hier stellt sich eine Differenz der Reaktionszeiten zwischen Tests vor und nach der Induktion ein. Allerdings ist der Betrag von ca. 25ms wesentlich kleiner als bei Versuchen mit bewegtem Induktionsobjekt. Auch die absolute Dauer der Reaktionszeit ist geringer als in vergleichbaren Messungen ohne Blinkinduktion. Alle Bewegungsrichtungen des Testobjekts werden in diesem Versuch gleich behandelt. Trotzdem tritt hier, wie schon in den Verschiebungsexperimenten eine geringere Empfindlichkeit für Bewegungen nach unten (270°) auf (Kreise, vor Aufblinken).

5.4.1.3 Reaktionszeithistogramme

Da sich, außer in den Experimenten mit bewegtem Hintergrundgitter, keine wesentlichen Richtungsabhängigkeiten der Reaktionszeiten auf die Testobjektbewegungen nachweisen lassen, ist durch Mittelung über alle Bewegungsrichtungen die Möglichkeit gegeben, die Zahl der Einzeltests pro Bewegungsrichtung bei gleicher Fehlergröße der Reaktionszeitmittelwerte zu reduzieren. Damit lassen sich bei gleicher Dauer einer Messung weitere Parameter variieren. Im Vordergrund der Analyse soll außerdem nicht die Richtungsabhängigkeit, sondern der Einfluß irgendeiner Objektbewegung auf ein zweites Objekt stehen. Einen direkten Einblick in die Wechselwirkungen beider Objekte geben die Histogramme in Bild 5.4.8. Es sind die relativen Häufigkeiten der Reaktionszeiten in 20ms Schritten für die einzelnen Bereiche aus Bild 5.4.2 aufgetragen, und jeweils der Maximalwert schraffiert. Testobjektbewegungen, die vor der

Induktion starten, fallen in Bereich I. Bewegungen, die während und nach der Induktion beginnen, gehören zu den Bereichen II bzw. III. Der experimentelle Aufbau entspricht den Angaben zu Bild 5.4.5.

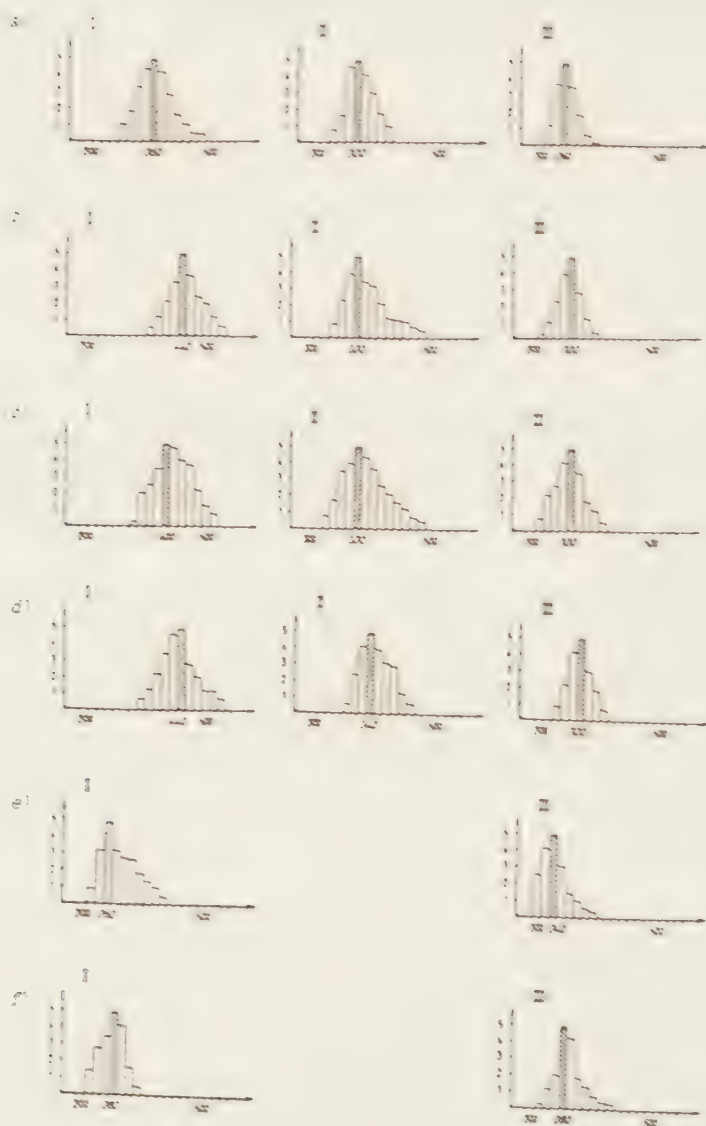


Fig. 6.4.9: Histogramme der Reaktionszeiten aus den Bereichen I, II und III bei verschiedenen Bewegungsgeschwindigkeiten der Objekte. Mittelwerte über alle verwendeten Bewegungsrichtungen. Ordinate: relative Häufigkeiten. Abszisse: Reaktionszeiten

in 20ms Rasterung. Versuchsablauf und Parameter wie bei Bild 5.4.5 beschrieben. V_I : Geschwindigkeit des Induktionsobjekts. V_T : Geschwindigkeit des Testobjekts. Eine Geschwindigkeit von 0.0°/s bedeutet, daß das Objekt zum Startzeitpunkt auf dem Monitor erscheint. (Blinkinduktion)

- a) $V_I = 1.8^\circ/\text{s}$. $V_T = 1.8^\circ/\text{s}$. $VP = KG$
- b) $V_I = 0.8^\circ/\text{s}$. $V_T = 1.5^\circ/\text{s}$. $VP = KG$
- c) $V_I = 0.8^\circ/\text{s}$. $V_T = 1.5^\circ/\text{s}$. $VP = TS$
- d) $V_I = 3.5^\circ/\text{s}$. $V_T = 1.5^\circ/\text{s}$. $VP = KG$
- e) $V_I = 0.0^\circ/\text{s}$. $V_T = 0.0^\circ/\text{s}$. $VP = KG$. Kontrollversuch
- f) $V_I = 0.0^\circ/\text{s}$. $V_T = 1.8^\circ/\text{s}$. $VP = KG$. Kontrollversuch

Der Vergleich der in Bild 5.4.8 a)-d) schraffierten Maximalwerte zeigt, daß sich die Reaktionszeiten zwischen Bereich I und III um ca. 100-140ms durch die Induktionsbewegung verbessern. Bei gleichen Objektgeschwindigkeiten (Bild 5.4.8 a)) erreicht die Versuchsperson KG die kürzeste Reaktionszeit von 260ms, während in den anderen Fällen ein Wert von 300ms die untere Grenze darstellt. Langsamere (Bild 5.4.8 b), c)) und schnellere (Bild 5.4.8 d)) Induktionsgeschwindigkeiten erhöhen die Antwortzeiten im Bereich I, nicht aber im Bereich III nach Ende der Induktion. Schon im Bereich II, bei den Teststartzeiten während des Induktionsvorgangs, setzt eine Erniedrigung der Reaktionszeiten ein. Gleichzeitig läßt sich im Vergleich zu Bereich III, eine deutlich breitere Verteilung der Reaktionszeiten beobachten. Auch im Bereich I ist die Streuung der Antwortzeiten wesentlich größer.

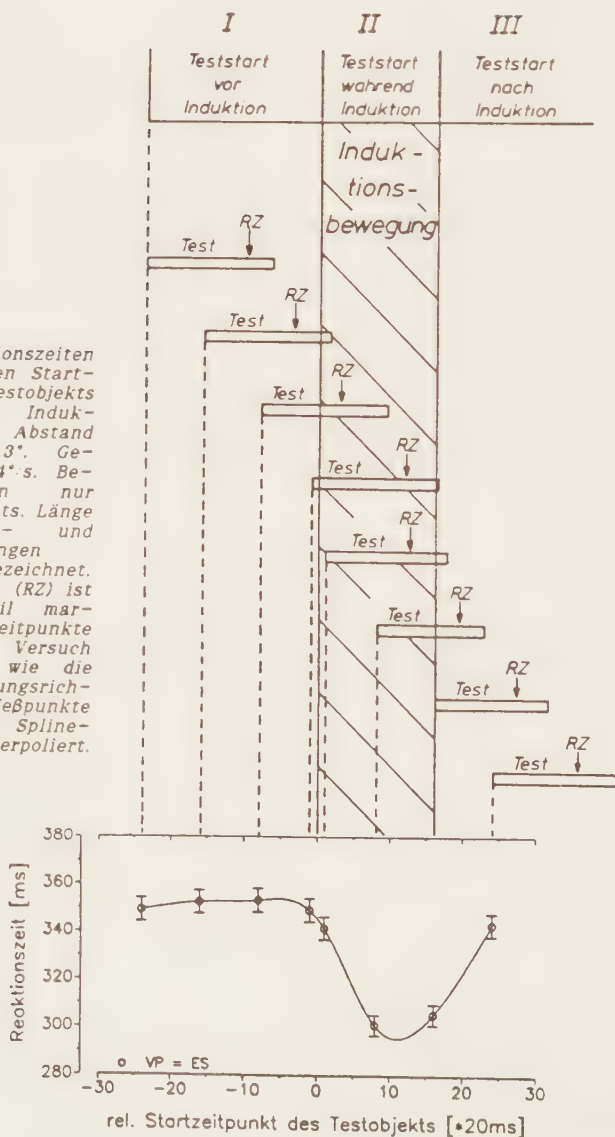
Bild 5.4.8 e) und f) zeigen die Ergebnisse von zwei Kontrollexperimenten. In e) finden keine Bewegungen der beiden Objekte statt. Zu den entsprechenden Startzeitpunkten der Bewegungen in Bild 5.4.8 a)-d) erscheinen die Objekte auf dem Monitor. Am Ende des Tests, nach der Reaktion der Versuchsperson, werden die Objekte wieder ausgeblendet, und der nächste Testdurchlauf kann beginnen. Neben einer Reduktion in der Breite der Verteilung sind nur sehr kleine Zeitunterschiede festzustellen (etwa 20-40ms). Der Absolutwert (260ms) ist jedoch, im Vergleich zu den Experimenten mit Bewegungen im Zeitbereich I oder III, merklich herabgesetzt. Das Ergebnis des Kontrollversuchs in Bild 5.4.8 f) kann zum direkten Vergleich mit den Bewegungsmessungen herangezogen werden. Im Versuch findet nur die Bewegung des Testobjekts statt, während die Induktion aus dem Aufblenden des Objekts besteht. Jetzt decken sich auch die Maximalwerte in den Histogrammen und sind nur geringfügig niedriger als die Werte aus den Bereichen III von Bild 5.4.8 a)-d).

5.4.1.4 Startzeitpunkte der Testbewegung

Aus den Histogrammen lassen sich natürlich keine quantitativen Schlüsse über die Wechselwirkung der beiden Objekte ziehen. Eine genauere Analyse-möglichkeit bietet der Versuch mit bezüglich der Induktion fest definierten Startzeitpunkten der Testobjektbewegung. Je vier Zeitpunkte aus den Berei-

Zeitbereiche

Bild 5.4.9: Reaktionszeiten auf den relativen Startzeitpunkt des Testobjekts bezüglich der Induktionsbewegung. Abstand der Objekte 2.3°. Geschwindigkeit 1.4°/s. Bewegungsrichtungen nur links oder rechts. Länge der Induktions- und Testobjektbewegungen sind jeweils eingezeichnet. Die Reaktionszeit (RZ) ist mit einem Pfeil markiert. Die Startzeitpunkte variieren im Versuch ebenso zufällig wie die beiden Bewegungsrichtungen. Die Meßpunkte sind mit einer Spline-Funktion interpoliert. VP = ES.



chen I sowie II und III werden getestet (Bereich I: 480ms, 320ms, 160ms, 20ms; Bereich II+III: 20ms, 160ms, 320ms, 480ms). Damit die VP sich nicht an ein Zeitraster gewöhnen kann, variieren diese Startzeitpunkte von Test zu Test zufällig. Als Bewegungsrichtungen sind nur Bewegungen nach links oder rechts zugelassen. Die Objektgeschwindigkeit beträgt 1.4°/s. Alle übrigen experimentellen Parameter sind entsprechend Bild 5.4.5 gewählt. Die Bewegungszustände mit den dazugehörigen Meßwerten hält Bild 5.4.9 fest.

Zu jedem Ergebniswert ist die zugehörige Dauer der Testbewegung aufgetragen. Die größte Wirkung der Induktion tritt bereits kurz nach der Hälfte ihrer Gesamtbewegung ein. Eine Verbesserung der Reaktionszeiten läßt sich danach nicht mehr erzielen. 480ms nach dem Induktionsstart erreichen die Antwortzeiten fast wieder den Wert der Startzeitpunkte aus Bereich I vor der Induktion (350ms). 20ms vor dem Induktionsstart beginnt bereits die Absenkung der Reaktionszeiten. Die Größe des Effektes erreicht bis zu 60ms. Die kürzeste durch die Induktion erzielbare Antwortzeit beträgt ca. 295ms.

Die Gültigkeit der Annahme der Induktionsrichtungsunabhängigkeit unterstreichen die Resultate in Bild 5.4.10. Die Bewegungsrichtungen stimmen in diesem Experiment mit den Angaben aus Bild 5.4.1 überein. Die beiden Kurven überdecken sich im Rahmen der Meßgenauigkeit, so daß die Mittelwertbildung erlaubt ist.

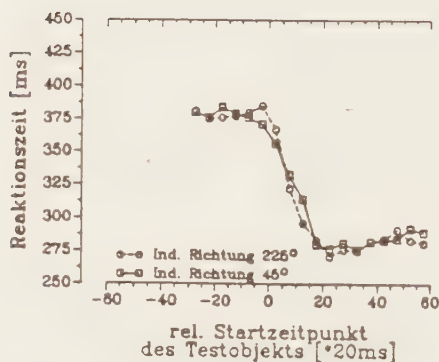


Bild 5.4.10: Reaktionszeiten auf den relativen Startzeitpunkt des Testobjekts bezüglich der Induktionsbewegung. Parameter wie bei Bild 5.4.1. VP = KG.

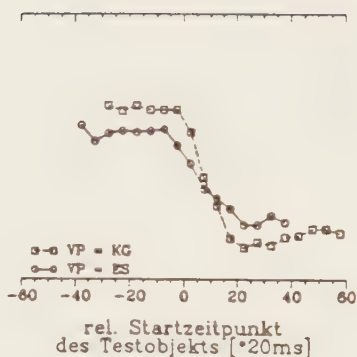


Bild 5.4.11: Reaktionszeiten auf den relativen Startzeitpunkt des Testobjekts bezüglich der Induktionsbewegung. Parameter wie bei Bild 5.4.1. Quadrate: Mittelwerte aus Bild 5.4.10, VP = KG. Kreise: Mittelwerte über alle Induktions- und Testobjektrichtungen. VP = ES.

Der Reaktionszeitgewinn beträgt hier etwa 100ms und erreicht einen Minimalwert von 275ms. Die Induktion erzeugt also eine ca. 30%ige Verbesserung der Antwortzeiten. Im gleichen Experiment liegt bei der Versuchsperson ES der Gewinn mit ca. 80ms etwas niedriger als bei KG aber immer noch bei ca. 25%. Die kleinste Reaktionszeit liegt für ES bei 283ms. In Bild 5.4.11 werden die Mittelwerte aus Bild 5.4.10 für KG den Meßresultaten von ES gegenübergestellt. Die Unterschiede zeigen sich außer in den Absolutwerten auch in einem breiteren Bereich, in dem die Induktion ihren Einfluß aufbaut. ES reagiert früher und länger auf die induzierende Objektbewegung.

Die Ergebnisse von zwei Kontrolleexperimenten, die anstatt einer Induktionsbewegung nur das Objekt aufblenden, sind in Bild 5.4.12 festgehalten. Im ersten Experiment (Kreissymbole) entspricht die Testobjektbewegung den Angaben aus Bild 5.4.1. Im zweiten besitzt auch das Testobjekt keine Bewegungsinformation und wird nur zum Startzeitpunkt t_0 eingeblendet.

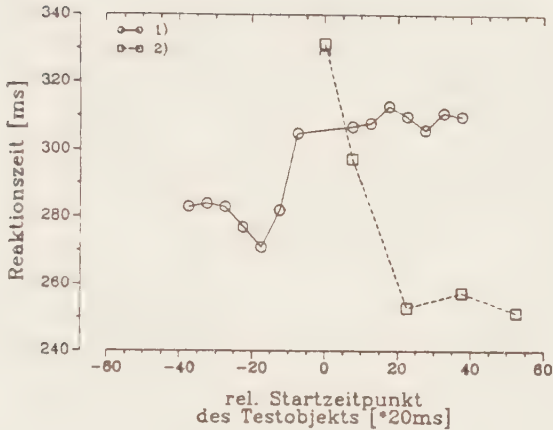


Bild 5.4.12: Reaktionszeiten auf den relativen Startzeitpunkt des Testobjekts bezüglich einer Induktion mit aufblinkendem Objekt. Parameter wie bei Bild 5.4.1. Kreise (1): Testobjekt bewegt sich wie unter Bild 5.4.1 beschrieben. Quadrate (2): Testobjekt blinkt zum Startzeitpunkt ebenfalls auf, keine Bewegungen während eines Testdurchgangs. VP = KG

Beim Versuch mit aufblinkenden Objekten fällt die Meßkurve von etwa 330ms, bei gleichzeitigem Erscheinen der Objekte, innerhalb von 400ms auf ca. 255ms ab. Im Experiment mit Testbewegung entsteht sich ein völlig anderer Kurvenverlauf. Ausgehend von 280ms vor der Induktion steigen die Antwortzeiten nach dem Aufblenden des induzierenden Objekts gleichmäßig auf etwa 310ms an. Es fällt auf, daß dieser Reaktionszeitwert schon 200ms vor der eigentlichen Induktion erreicht wird. Die beiden grundsätzlich verschiedenen Kurven für mit und ohne Testbewegung lassen bereits die getrennte, d.h. von unterschiedlichen Mechanismen im visuellen System durchgeführte, Verarbeitung bewegter und statischer Objekte erkennen.

Im einem weiteren Experiment werden die Wechselwirkungen zwischen globaler und lokaler Bewegungsinformation untersucht. Bild 5.4.13 zeigt die Abhängigkeit der Reaktionszeiten vom Startzeitpunkt des Testobjekts bei bewegtem Hintergrundgitter. Die Parameter stimmen mit den aus Bild 5.4.6 überein. Parameter der Meßkurven in Bild 5.4.13 sind die beiden Bewegungsrichtungen des Hintergrundgitters 0° und 180° . Im Rahmen der Meßgenauigkeit kann hier kein Unterschied in den Reaktionszeiten für beide Richtungen festgestellt werden. Deutlich tritt jedoch die Absenkung der Reaktionszeiten nach der Induktion hervor. Beträgt sie vor der Induktion noch ca. 360ms, so fällt sie nach der induzierenden Bewegung unabhängig von Induktions- oder Testrichtung innerhalb von 400ms auf etwa 280ms ab.

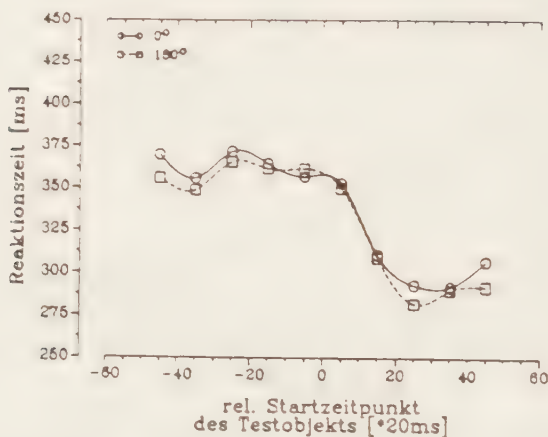


Bild 5.4.13: Mittlere Reaktionszeit auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts bei zufälligem Startzeitpunkt der Testobjektbewegungsrichtung mit Hintergrundbewegung. Zufällige Mischung der Induktionsrichtungen 45° und 225° und der Bewegungsrichtungen des Hintergrundgitters. Parameter wie bei Bild 5.4.6. Kreise: Bewegungsrichtung des Hintergrundgitters 0° , Quadrate: 180° . Die Meßpunkte sind durch eine Spline-Interpolation miteinander verbunden. VP = KG.

Eine genauere Aufschlüsselung der Beziehung zwischen Induktions-, Test- und Hintergrundgitterbewegungsrichtung ist mit Hilfe der Ergebnisse eines weiteren Experiments (Bild 5.4.14a)-c)) möglich. Im Gegensatz zum Versuch aus Bild 5.4.13 finden hier nur Bewegungen nach links oder rechts statt. Damit bleibt die Zahl der auf alle Tests gleichmäßig verteilten Parameter in Grenzen, und die Dauer einer experimentellen Sitzung für die Versuchsperson in einem erträglichen Rahmen. Die Teilbilder a) und b) zeigen die Reaktionszeiten für Hintergrundbewegungen nach rechts (0°) und nach links (180°). In beiden Diagrammen ist kein Einfluß der Induktionsbewegungsrichtung auszumachen, so daß, wie in Teilbild c) geschehen, eine Mittelwertbildung über die induzierende Richtung erlaubt ist. Die Mittelung unterstreicht die schon in Bild 5.4.14 a) und b) bestehenden Unterschiede. Gegensinnige Bewegungen (Dreieck und Quadrat) von Testobjekt und Gitter können leichter erkannt werden und besitzen ca. 50ms geringere Reaktionszeitwerte. Dieser Unterschied steigt für Startzeitpunkte vor der Induktion bei gleicher Richtung von Testobjekt und Gitter nochmals an (Teilbild c), durchgezogene Kurve, Kreissymbole). Die zusätzliche Erhöhung der Antwortzeiten wird erst durch den Einfluß der Induktionsbewegung beseitigt.

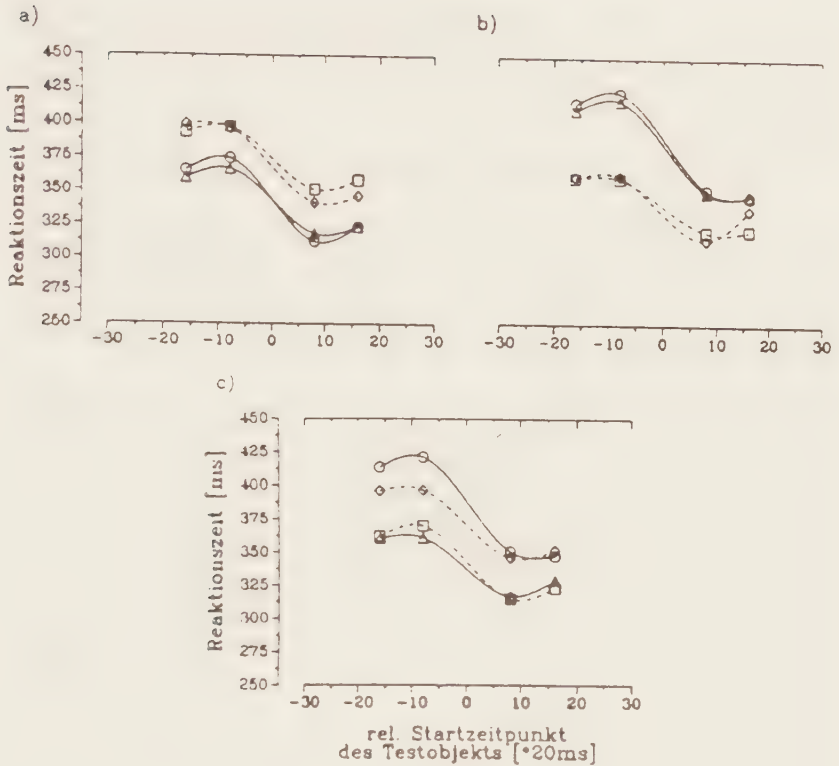


Bild 5.4.14: Abhängigkeit der mittleren Reaktionszeit auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts bei zufälligem Startzeitpunkt der Testobjektbewegungsrichtung mit Hintergrundbewegung. Zufällige Mischung der Induktionsrichtungen 0° und 180° und der Bewegungsrichtungen 0° und 180° des Hintergrundgitters. Parameter wie bei Bild 5.4.6. Die Meßpunkte sind durch eine Spline-Interpolation miteinander verbunden. Linientypen aus a) und b) bleiben in c) als Linien der Mittelwerte erhalten. VP = ES. Hintergrundgitterbewegungsrichtung 0° (nach rechts) a), 180° (nach links) b).

Kreise: Induktionsrichtung 180°, Testrichtung 180°

Quadrate: Induktionsrichtung 180°, Testrichtung 0°

Dreiecke: Induktionsrichtung 0°, Testrichtung 180°

Rauten: Induktionsrichtung 0°, Testrichtung 0°

c) Mittel über Induktionsrichtungen 0° und 180° aus a) und b).

Kreise: Testrichtung 180°, Gitterrichtung 180°

Quadrate: Testrichtung 180°, Gitterrichtung 0°

Dreiecke: Testrichtung 0°, Gitterrichtung 180°

Rauten: Testrichtung 0°, Gitterrichtung 0°

Alle Kurven zeigen unabhängig von der Bewegungsrichtung des Gitters den Einfluß der Absenkung der Reaktionszeiten für Tests nach der Induktionsbewegung. Kurz vor der Induktion (160ms) sind die Werte am höchsten. 160ms danach erreichen sie ein Minimum.

5.4.1.5 Diskussion der Ergebnisse des Experiments mit zwei Objekten

Die Reaktionszeitergebnisse lassen hier, wie die Schwellenwerte beim Verschiebungsexperiment, Wechselwirkungen zwischen Test- und Induktionsobjekt erkennen. Die Resultate zeigen in Analogie zum Verschiebungsexperiment keine Induktionsrichtungsabhängigkeit beim Testobjekt. Eindeutig nachweisbar ist aber die Verbesserung der Antwortzeiten auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts durch einen ebenfalls bewegten Induktionsreiz.

Die Diagramme in Bild 5.4.3 und Bild 5.4.4 weisen auf die Bedeutung des Parameters Objektgeschwindigkeit für das visuelle System hin. In den Reaktionszeiten, die über den Bewegungsrichtungen aufgetragen sind, zeigt sich neben einer generellen Erniedrigung bei höheren Geschwindigkeiten auch der Einfluß der durch die FMG - Rasterung bedingten Unterschiede der Bewegungsgeschwindigkeiten für diagonale und vertikal - horizontale Richtungen.

Nach Bild 5.4.8 können gleiche Geschwindigkeiten von Induktions- und Testobjekt die absolut niedrigsten Antwortzeiten erzeugen. Größere oder kleinere Induktionsgeschwindigkeiten lassen zwar die relative Höhe des Effekts anwachsen, die Reaktionszeiten von Bewegungen mit gleichen Geschwindigkeiten werden aber nicht erreicht. Dies spricht für eine Verarbeitung der Informationen in Geschwindigkeitskanälen mit geringer Bandbreite. Objekte mit gleichen Bewegungsgeschwindigkeiten fallen in dieselbe Merkmalsgruppe, so daß sie parallel ausgewertet und sofort einander zugeordnet werden können. Die Streubreite der Histogramme kann man auch als ein Maß für die Sicherheit auffassen, mit der der Testreiz registriert wird. Eine scharfe Verteilung zeigt, daß die Versuchsperson auf das eintreffende Ereignis schon vorbereitet war. Ursache dafür kann zum einen eine Erwartungshaltung, zum anderen die Sensibilisierung der richtigen Verarbeitungskanäle oder -ebenen sein. Im Übergangsbereich zwischen Bewegungen vor und nach der Induktion wechselwirken zwei sich gegenseitig störende, konkurrierende Prozesse und verursachen so eine besonders breite Verteilung der Antwortzeiten.

Dies alles unterstreicht die fundamentale Bedeutung des Parameters Objektgeschwindigkeit für die Verarbeitung von Bewegungen durch das visuelle System (siehe auch z.B. TOMPSON, 1976; TYNAN, 1982; JONSTON, 1983).

Die Tatsache, daß in allen Experimenten keine Abhängigkeit und keine wechselseitige Beeinflussung der Bewegungsrichtungen von Induktions- und Testobjekt vor, während und nach der Induktion (siehe Bild 5.4.5) existieren, deutet darauf hin, daß bei einer Induktionsbewegung nur die Bewegung selbst

das auslösende und bestimmende Moment für die Erniedrigung der Antwortzeiten ist.

Wichtig zur Erzeugung des Effekts ist nur die Existenz irgendeiner lokalen induzierenden Bewegung. Eine von Null verschiedene Testbewegungsgeschwindigkeit bewirkt eine weitere Erhöhung der Empfindlichkeit für die Wahrnehmung dieser Testobjektbewegung.

Erst mit dem Einführen der globalen Hintergrundbewegung ändert sich die Richtungsabhängigkeit der Bewegungen. Das Gitter wird als (bewegtes) Referenzmuster benutzt, und somit die Erkennung einer gleichgerichteten Bewegung des Testobjekts wesentlich erschwert (siehe auch MORI, 1984). Die Größe der durch das Hintergrundgitter verursachten Reaktionszeiterhöhung bei gleichgerichteten Bewegungen entspricht in etwa dem Zeitgewinn, der sich mit einer Induktion erreichen läßt (siehe Bild 5.4.6 b), bei 0° und 180°). Da sich beide Effekte gegenseitig bedingen, entstehen sie vermutlich auch auf der selben Verarbeitungsebene und benutzen gemeinsame neuronale Strukturen.

Das Kontrollexperiment mit aufblinkendem Induktionsobjekt (Bild 5.4.7) macht im Vergleich zur bewegten Induktion die Unterschiede in der Verarbeitung von Bewegungsreizen sichtbar. In Bild 5.4.15 sind die Kurven für die induzierende Bewegung aus der Mittelung über die beiden Induktionsrichtungen 45° und 225° von Bild 5.4.5 a) für Teststartzeitpunkte vor, während und nach der Induktion entstanden. Die Daten mit aufblinkender Induktion entsprechen Bild 5.4.7.

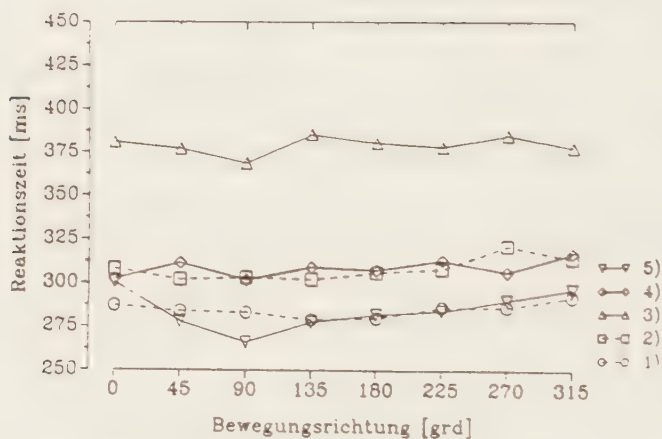


Bild 5.4.15: Vergleich der Ergebnisse aus Bild 5.4.7 für aufblinkenden mit denen aus Bild 5.4.5 a) für bewegten Induktionsreiz. Die Induktionsbewegung ist über die Induktionsrichtungen 45° und 225° gemittelt. Durchgezogene Linie: induzierende Objektbewegung, gestrichelte Linie: induzierendes Objektaufblenden. Restliche Parameter siehe Bild 5.4.7 und Bild 5.4.5. VP = KG. Legende: Test 1) vor 2) nach induzierendem Aufblinken, Test 3) vor 4) während 5) nach induzierender Bewegung. Die Größe der Symbole entspricht der Schwankung des Mittelwertes der Reaktionszeiten.

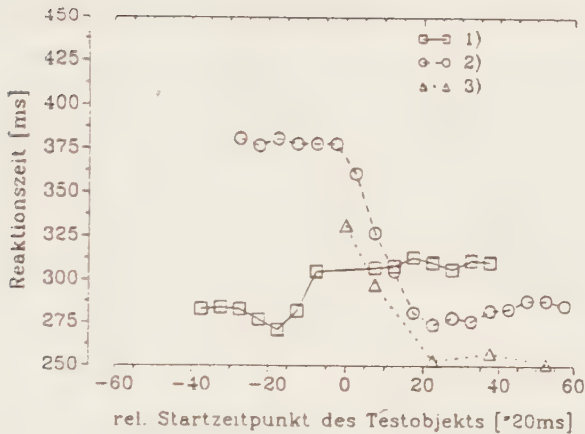


Bild 5.4.16: Vergleich der Startzeitpunkte des Testreizes für Experimente mit bewegtem und mit aufblinkendem Induktionsobjekt. Quadrate (1): induzierendes Aufblenden - Testbewegung, Parameter wie in Bild 5.4.12. Kreise (2): induzierende Bewegung - Testbewegung, Parameter wie in Bild 5.4.11. Dreiecke (3): induzierendes Aufblenden - Aufblenden des Testobjekts. Parameter wie in Bild 5.4.12.

Die beiden Meßaufgaben lösen bei der Versuchsperson verschiedene Verarbeitungsmechanismen aus. Die Daten aus Bild 5.4.15 spalten sich deutlich zwischen Versuche mit aufblinkender und solchen mit bewegter Induktion auf. Die Antwortzeiten auf den Start der Testobjektbewegung vor der Induktion sind nicht gleich. Erwartet die VP eine bewegte Induktion, die dann jedoch nicht stattfindet (Dreiecke (3) in Bild 5.4.15), so sind Verarbeitungskanäle aktiv, die auf die Testbewegung nur schlecht reagieren können. Erst mit einer vorher stattfindenden bewegten Induktion erreichen die Reaktionszeiten das Niveau der Messungen mit aufblinkendem Induktionsobjekt (Kreise (1), Quadrate (2)). Die Werte bei bewegter Induktion decken sich, falls die Testbewegung schon während der Induktionsbewegung startet, mit den Zeiten bei einer blinkenden Induktion aus dem Zeitbereich I (Quadrate (2) und Rauten (4)). Durch die Vorinformation über den möglichen Versuchsablauf werden hier verschiedene Mechanismen angesprochen und können durch die unterschiedlichen Antwortzeiten getrennt werden. Bild 5.1.1 erhält hier seine prinzipielle, experimentelle Bestätigung.

Die einzelnen beteiligten Mechanismen dokumentieren sich auch in den Vergleichskurven von Bild 5.4.16. Die Startzeitpunkte des Testreizes zeigen eine große Abhängigkeit von der Art des Versuchs (Induktion mit Bewegung oder nur Aufblenden des Objekts) und des Testreizes (bewegt, aufblenden).

Die Verringerung der Reaktionszeiten durch eine Induktion kann man sowohl bei bewegten Objekten als auch bei nur aufblinkenden Reizen beobachten (Quadrate (1), Kreise (2)). Die Steigungen sind in etwa identisch, und ein Minimum wird ca. 450ms nach dem Induktionsstart erreicht. Aufblinkende Testreize können bis zu 30ms schneller erkannt werden. Der Wert 330ms bei 0 ist die Reaktionszeit auf das gleichzeitige Aufblenden beider Objekte. Trotz der eingeschobenen Blanktests, die eine Unsicherheit über das Auftauchen des Testreizes verursachen, fällt dann dieser Wert um bis zu 80ms ab, wenn man die Reize nacheinander einschaltet. Somit kann der Effekt nicht alleine auf die Vorinformation der Versuchsperson über den Versuchsablauf zurückgeführt werden. Die Geschwindigkeit der Informationsverarbeitung hängt entscheidend von der Vorgeschichte ab. Komplexe visuelle Eingangssignale (zwei Objekte) benötigen längere Verarbeitungszeiträume bevor sie ein spezielles Schwellenkriterium erreichen.

Die Versuchsreihe mit gemischten Reizen (Induktion: aufblinken, Test: Bewegung; Quadrate in Bild 5.4.16) liefert einen vollständig anderen Kurvenverlauf. Hier besitzen Testobjektbewegungen vor der eigentlichen Induktion ca. 25-30ms niedrigere Reaktionszeiten als Bewegungen danach. Der darauf folgende Anstieg ist zwar im Vergleich zum Abfall bei bewegten Reizen bescheiden, aber dennoch sicher nachweisbar. Das Minimum liegt bei etwa 350ms vor der Induktion. Hier findet noch keine Überschneidung der ungefähr 270-310ms langen Reaktionszeit auf die Testbewegung mit dem Aufblenden des induzierenden Objekts statt. Bei Tests, die 250ms vor dem Induktionsreiz beginnen, liegt der Zeitpunkt der Reaktion (282ms) bereits 32ms nach dem Induktionsbeginn. Mit anderen Worten: Die durch die Induktion erzeugte Störung kann 32ms auf die Versuchsperson einwirken. Der Startzeitpunkt 150ms erhöht die Wirkungszeit der Störung schon auf 155ms (bei 305ms Reaktionszeit).

Im Gegensatz zu der Induktion mit aufblinkendem Objekt wirkt eine induzierende Bewegung nicht als Störung, die die Reaktionszeiten erhöht, sondern beschleunigt die Verarbeitung von weiteren Bewegungsinformationen mit deutlich niedrigeren Antwortzeiten. Der positive Einfluß der Induktionsbewegung benötigt aber einen längeren Wirkungszeitraum. Erst wenige Millisekunden vor der Induktion beginnt sich die Wechselwirkung bemerkbar zu machen. Das Minimum erreicht dann aber schnell das Niveau der Meßwerte mit Blink-Induktion.

Der Vergleich der relativen Startzeitpunkte der Testobjektbewegung mit und ohne Hintergrundbewegung wird in Bild 5.4.17 durchgeführt (Quadrate, Kreise). Das globale Hintergrundgitter senkt die Maximalwerte und hebt die Minimalwerte an, so daß der Gewinn an Erkennbarkeit im Vergleich zu den Daten ohne Gitter um ca. 30-40ms reduziert wird. Der Gesamteffekt ist jedoch mit etwa 70ms beträchtlich. Die Steigung im Übergangsbereich ist etwas geringer als ohne Gitter. Eine globale Bewegung kann den lokalen Transfer von

Bewegungsinformation also nicht unterdrücken und muß demnach auf einer anderen Ebene der kortikalen Verarbeitung vonstatten gehen.

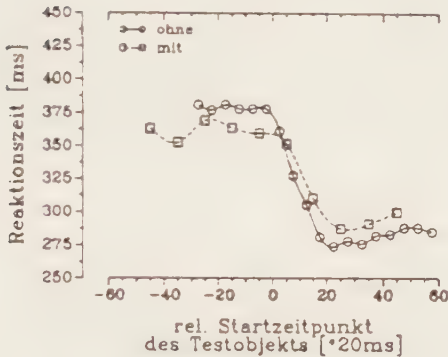


Bild 5.4.17: Vergleich der Reaktionszeiten auf die einsetzende Bewegung des Testobjekts mit und ohne Hintergrundgitterbewegung. Quadrate: mit bewegtem Hintergrundgitter, Parameter wie in Bild 5.4.13, Mittelwerte über Hintergrundbewegungsrichtungen 0° und 180°. Kreise: ohne Hintergrundgitter, Parameter wie in Bild 5.4.11. VP = KG.

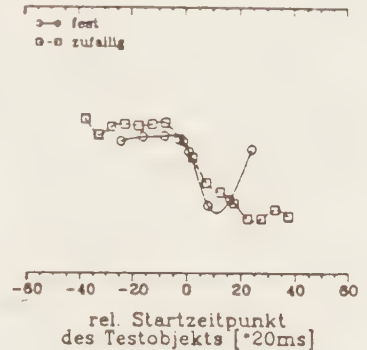


Bild 5.4.18: Vergleich der Versuche mit zufälligen und festen Startzeitpunkten des Testobjekts. Kreise: Induktion- und Testbewegungen nur horizontal nach links oder rechts. Mittel über alle Richtungen. Quadrate: Induktion mit Bewegungen in Richtung 45° und 225°, Test mit 0°, 45°, ..., 315° (siehe Bild 5.4.11). VP = ES.

Betrachtet man die Startzeitpunktdiagramme Bild 5.4.9 und Bild 5.4.11, so fällt auf, daß in Bild 5.4.11 für die VP ES das Erreichen des Normalwertes (ca. 360ms) 750ms nach der Induktion noch nicht erfolgt ist. Der Ursprung dieser Differenzen liegt an den unterschiedlichen Bewegungsrichtungen in den Versuchen und den zufälligen oder fest vorgegebenen Startzeitpunkten des Testreizes. Im Experiment mit festen Testzeitpunkten sind nur horizontale links-rechts Bewegung von Test und Induktionsobjekt erlaubt. Dagegen benutzt der Versuch aus Bild 5.4.9 eine Mischung aus den Bewegungsrichtungen nach Bild 5.4.1; Bild 5.4.18 faßt beide Kurven zusammen.

Die unterschiedlichen Reaktionszeitwerte vor der Induktion entstehen möglicherweise aus einem geänderten inneren Aktivitätszustand der Versuchsperson, da die beiden Experimente im Abstand von einigen Tagen durchgeführt wurden. Die Einflüsse der Tagesform lassen sich durch Ausgleichen der Mittelwerte gegebenenfalls beseitigen. Nur besteht hierbei die Gefahr eventuell vorhandene Effekte aus den Reaktionszeiten herauszumitteln.

Nimmt man die Steigungen des fast linear abfallenden Teils der Kurve als Maß für die Schärfe des Effekts der Reaktionszeiterniedrigung, so erzeugen horizontale links/rechts Bewegung einen steileren Abfall (-0.29 im Vergleich zu -0.12). Die Bandbreite ist ebenfalls sichtlich reduziert.

Der Steigungsparameter ist stark von der Versuchsperson abhängig und beträgt in Bild 5.4.11 für VP KG -0.27 , bei ES nur -0.12 . Im Übergangsbereich von Bild 5.4.13 ergibt sich ein Wert von -0.21 . Damit wird deutlich, daß das Hintergrundgitter doch nicht ganz ohne Einfluß auf den Transfer von lokaler Bewegungsinformation ist. Seine Anwesenheit verlangsamt die Weitergabe der Bewegungsinformation.

5.4.2 Messung mit Balkenobjekt

Wie aus den Histogrammen der Experimente mit zwei Objekten hervorgeht, spielt der Parameter Objektgeschwindigkeit beim Transfer von Bewegungsinformation eine wichtige Rolle. Unterschiede in den Geschwindigkeiten von Induktions- und Testobjekt reduzieren den Reaktionszeitgewinn. Dagegen wird der Effekt maximal, wenn die Bewegungsgeschwindigkeiten übereinstimmen. Die Größe Geschwindigkeit kann also als ein einem Objekt zugeordnetes Merkmal interpretiert werden. Gesucht ist nun eine experimentelle Anordnung, die eine mögliche Orts- Zeitkorrelation bzw. eine Korrelation eines Geschwindigkeitsfelds des visuellen Systems beim Verarbeiten von Bewegungen aufdecken kann. Die Messung von Reaktionszeiten auf das Erscheinen eines sich über das gesamte Beobachtungsfeld mit konstanter Geschwindigkeit bewegendes Balkenobjekt läßt auf eine weiterführende Analyse des Informationstransfers hoffen.

5.4.2.1 Versuchsaufbau und Versuchsablauf

Versuchsaufbau und Versuchsablauf beschreiben die Diagramme in Bild 5.4.19. In jedem Teilversuch findet eine zufällige Mischung der jeweils relevanten Parameter statt.

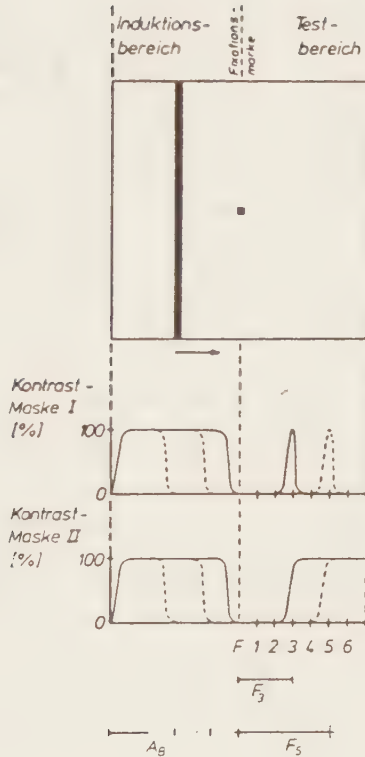


Bild 5.4.19: Versuchsaufbau und Ablauf für das Experiment mit einem im gesamten Beobachtungsfeld bewegten Balkenobjekt. Grundeinstellung der Parameter:

Feldgröße	: $3.7^\circ \times 3.7^\circ$
Balkenbreite	: 0.059°
Induktionsfeldbreite IB	: $0.68^\circ, 1.00^\circ, 1.33^\circ, 1.65^\circ$
Induktionsstartpunkt	: 1.89°
Größe des Fixationspunkts	: $0.06^\circ \times 0.06^\circ$
Halbwertsbreite des Testgauß	: 0.059°
Testgeschwindigkeiten V_T	: $0.0^\circ/\text{s}, 1.5^\circ/\text{s}, 3.0^\circ/\text{s}$
Induktionsgeschwindigkeiten V_I	: $0.0^\circ/\text{s}, 1.5^\circ/\text{s}, 3.0^\circ/\text{s}$
Testbewegungsrichtungen	: links / rechts
Induktionsbewegungsrichtung	: rechts
Induktionskontrast	: 50–100%
Testkontrast	: 20%, 50%, variabel
Leuchtdichte	: 25 cd/m^2
Objektfarbe	: weiß

Entfernung der Testorte vom Fixationspunkt:

$F_1 = 0.24^\circ$,	$F_2 = 0.47^\circ$,	$F_3 = 0.71^\circ$,
$F_4 = 0.95^\circ$,	$F_5 = 1.18^\circ$,	$F_6 = 1.42^\circ$.

Masken: gaußförmig mit $\sigma = 0.059^\circ$

Ein Test beginnt nach einem "Fertig"-Signal der Versuchsperson mit der Induktionsbewegung des Objekts auf der linken Monitorhälfte. Der Bereich der sichtbaren Induktionsbewegung reicht je nach Wahl des Versuchsparameters Induktionsfeldbreite (IB) bis maximal zur Fixationsmarke. Bei Kontrollmessungen ohne Induktion ist dieser Maskenteil auf den Wert 0 gesetzt. In der rechten Monitorhälfte bewegt sich das Balkenobjekt am Ort X_1 zum Zeitpunkt T_j unter einer gaußförmigen Maske hindurch (Maske I) oder ist bis zum entgültigen Verschwinden am rechten Bildschirmrand sichtbar (Maske II). Die Testorte und Zeitpunkte sind frei wählbar und reichen, wie in Bild 5.4.19 beschrieben, von $i, j = 1 \dots 6$. Besitzt das Objekt auf der Induktionsseite die konstante Geschwindigkeit V_1 , und erscheint der Balken im Testbereich am Ort X_1 zur Zeit T_j , wobei $V_1 = X_1 / T_j$ und $i = j$ gelten soll, so ist die Bewegung aus der Induktionsphase kontinuierlich fortgesetzt. Der Test erfolgt dann für die Geschwindigkeit V_1 zum korrekten Orts- Zeitverhältnis. Alle anderen Kombinationen ($i \neq j$) täuschen eine positive oder negative Beschleunigung des Balkens vor, die er hinter der Maske erfahren hat. Die Geschwindigkeiten während des Induktions- und Testvorgangs sind immer konstant gewählt. Maßgebend für das Erscheinen des Objekts am Testort ist immer die induzierende Geschwindigkeit, unabhängig von der Objektgeschwindigkeit während des Tests.

Die Versuchsperson fixiert die Marke in der Bildschirmmitte und muß, sobald sie das Objekt in der rechten Bildhälfte auftauchen sieht, möglichst schnell eine Reaktionszeittaste auf dem IVI niederdrücken. Danach ist ein Testdurchgang beendet. Jede Versuchssitzung besteht aus der zufälligen Mischung aller möglichen X_1 - und T_j -Werte. Versuchsreihen, die sich über mehrere Tage erstrecken, können durch den Tagesformausgleich dann wieder zusammengefaßt werden (siehe auch Bild 5.4.21).

Bild 5.4.20 zeigt nochmal einige mögliche Testvarianten bei fest vorgegebener Induktionsgeschwindigkeit. Aufgetragen sind die Testorte über den Testzeitpunkten. Die Testorte und -zeiten gruppieren sich um eine Gerade, die durch die Geschwindigkeit der Induktionsbewegung festgelegt ist. Die Größe der Punkte symbolisiert die durch die Masken erzeugten weichen Ein- und Ausschaltvorgänge der Reize.

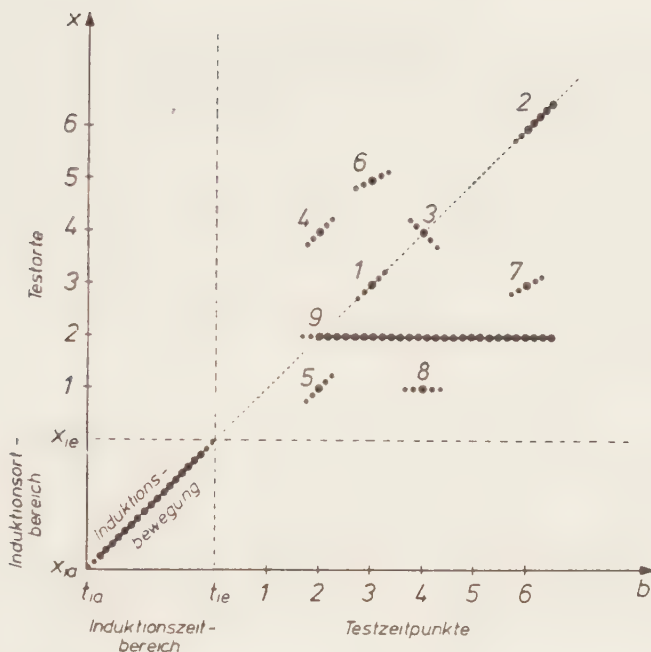


Bild 5.4.20: Einige Testvarianten bei fest vorgegebener Induktionsgeschwindigkeit. Aufgetragen sind die Testorte 1..6 über den Testzeitpunkten 1..6. Start der Induktion bei $x=x_{ia}$ und $t=t_{ia}$, Ende bei $x=x_{ie}$ und $t=t_{ie}$. Für Testorte und Zeitpunkte, die auf der Geraden der Induktionsbewegung liegen, gilt $V_i = X_i/T_j$, mit $i = j$, $i, j = 1..6$. V_r : Induktionsbewegungsgeschwindigkeit. V_r : Testbewegungsgeschwindigkeit. $V_r = 0$ bedeutet ein einfaches Aufblenden des Balkens am Ort X_i zur Zeit T_j . Die diskreten Punkte entstehen durch die Rasterung im Ort (1 Pixel = 0.0148° Sehwinkel) und in der Zeit (1 Bild = 20ms). Die Größe der Punkte steht für die jeweilige Kontrasthöhe.

Testvariation 1: Ort=3, Zeit=3, Maskentyp I, $V_i = V_r$.
 Testvariation 2: Ort=6, Zeit=6, Maskentyp II, $V_i = V_r$.
 Testvariation 3: Ort=4, Zeit=4, Maskentyp I, $V_i = -V_r$.
 Testvariation 4: Ort=4, Zeit=2, Maskentyp I, $V_i = V_r$.
 Testvariation 5: Ort=1, Zeit=2, Maskentyp I, $V_i = V_r$.
 Testvariation 6: Ort=5, Zeit=3, Maskentyp I, $V_i < V_r$.
 Testvariation 7: Ort=3, Zeit=6, Maskentyp I, $V_i < V_r$.
 Testvariation 8: Ort=1, Zeit=4, Maskentyp I, $V_r = 0$.
 Testvariation 9: Ort=2, Zeit=2, Maskentyp II, $V_r = 0$.

Die Varianten 1, 2 und 9 erfüllen die Bedingung eines korrekten Auf-tauchens des Balkens gemäß $V_i = X_i/T_j$, mit $i = j$. Hier findet eine kontinuierliche Bewegung des Objekts auch in den nicht sichtbaren Gebieten hinter der Maske statt, während bei den Bedingungen 6 und 7 das Objekt eine scheinbare negative oder positive Beschleunigung erfährt. Testvarianten 8 und

9 besitzen keine Bewegung, sondern nur ein nach einer Gaußfunktion gesteuertes Aufblenden des Maskenkontrastes. Bedingung 2 und 9 verwenden Masken des Typs II aus Bild 5.4.19. Die Rasterung in Ort (1 Pixel = 0.0148° Sehwinkel) und Zeit (1 Bild = 20ms) wird durch die einzelnen Punkte angedeutet. Die Größe der Punkte steht für verschiedene Kontrastwerte des Objekts.

In Tabelle 5.4.1 sind für die Geschwindigkeit $V_i = 1.5^\circ/\text{s}$ bei verschiedenen Induktionsgrößen die Testzeitpunkte nach dem Induktionsende aufgeführt. Die Zahlen der Tabelle erfüllen, unter Berücksichtigung des Induktionsstartpunktes bei 1.89° Exzentrizität, die Gleichung $V_i = X_i/T_i$. Das kürzeste Zeitintervall ohne Objektbewegung auf dem Monitor beträgt demnach 320ms, das längste 1780ms. Eine Verdopplung der Geschwindigkeit auf $3.0^\circ/\text{s}$ hat eine Halbierung dieser Zeiten zur Folge.

Induktionsreiz		Testreiz						
Breite [°]	Dauer [ms]	Nummer:	1	2	3	4	5	6
		Ort[°]:	0.24	0.47	0.71	0.95	1.18	1.42
		Zeitpunkte nach Induktionsende [ms]						
1.65	1120		320	480	640	800	960	1120
1.33	900		540	700	860	1020	1180	1340
1.00	680		760	920	1080	1240	1400	1560
0.68	460		980	1140	1300	1460	1620	1780

Tabelle 5.4.1: Startzeitpunkte der Tests nach Ende des Induktionsreizes bei unterschiedlicher Induktionsgröße. Die Bewegungsgeschwindigkeit beträgt hier $1.5^\circ/\text{s}$. Startpunkt der Induktionsbewegung bei 1.89° .

5.4.2.2 Auswertemethode

Messung der Reaktionszeiten einer Versuchsperson sind sehr datenintensiv und langwierig. Die Mischung aller relevanten Größen eines Experiments ist für die Versuchsperson zur vorurteilsfreien Durchführung einer Meßreihe unerlässlich, da Erwartungshaltungen die Resultate verzerren und unter Umständen Effekte vortäuschen. Die Fülle aller Parameter eines psychophysikalischen Versuchs läßt sich aber auf keinen Fall in einer Versuchssitzung innerhalb einer für die Versuchsperson zumutbaren Zeit bewältigen. Außerdem treten bei längeren Meßsitzen relativ schnell Ermüdungserscheinungen auf, die sich gerade bei Reaktionszeitexperimenten störend auf die Ergebnisse auswirken. Der vollständige Satz von Testort- Testzeitkombinationen benötigt bei den verwendeten 44 Einzelwerten pro Kombination 1584 ($= 44 \times 6 \times 6$) Reaktionen. Dies entspricht einer Versuchsdauer von etwa 3 Stunden. Versuche mit bestimmten Parameterkonstellationen sind deshalb in der Regel auf mehrere Tage verteilt. Je nach Tag und Tageszeit schwanken die Mittelwerte der Reaktions-

zeiten einer Versuchsperson bei identischer Versuchsanordnung beträchtlich und sind nicht direkt miteinander vergleichbar (Bild 5.4.21). In allen Experimenten sind deshalb die Parameterkombinationen gleichberechtigt und werden, zufällig verteilt, in jeder experimentellen Sitzung getestet. Die Mittelwertbildung m_j über alle Reaktionszeiten RZ_{ij} , unabhängig von den Parametern, bildet aus diesem Grund ein Maß für die augenblickliche Tagesform (m_j) der Versuchsperson. Aus dem Vergleich der Tagesformzeiten mit der mittleren Tagesform M lassen sich Korrekturwerte für die einzelne Reaktionszeitmittelwerte aus jeder Sitzung bestimmen und anpassen. Der korrigierte Reaktionszeitwert RZ_{ij}' berechnet sich also wie folgt:

$$RZ_{ij}' = RZ_{ij} + (M - m_j)$$

$$m_j = \frac{1}{i} \sum_i RZ_{ij} / 1, \quad M = \frac{k}{j} \sum_j m_j / k$$

i : Nummer der Reaktionszeit aus einer Meßsitzung, 1..1
 j : Nummer der Meßsitzung, 1..k
 m_j, M : Tagesformwerte
 RZ_{ij} : Reaktionszeitwert i aus Meßsitzung j
 RZ_{ij}' : korrigierter Reaktionszeitwert

Die Tagesformwerte schwanken, je nach Versuchsperson, bis zu 30ms (siehe auch Bild 5.4.23 Kreis- und Quadratsymbol). Neben den Tagesformmittelwerten besteht auch die Möglichkeit, aus der Breite der Verteilung Rückschlüsse auf die aktuelle Ergebnisqualität der VP zu ziehen. Die Auswertung berücksichtigt die Art der Verteilung jedoch nicht.

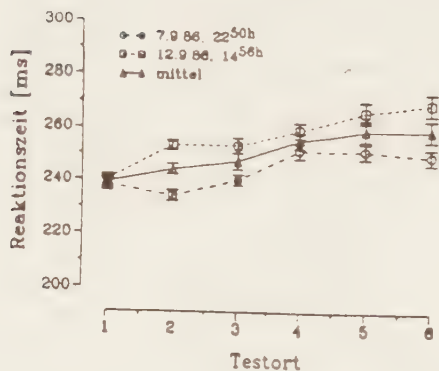


Bild 5.4.21: Einfluß der Tagesform der Versuchsperson TS auf die Reaktionszeiten bei Testpositionen 1..6. Kontrollmessung ohne Induktionsbewegung. Testzeiten liegen zufällig verteilt im Zeitintervall [1, 3] Sekunden nach dem IVI Startton. Maskentyp II. Bewegungen nach rechts. Restliche Parameter wie bei Bild 5.4.19. VP = TS.

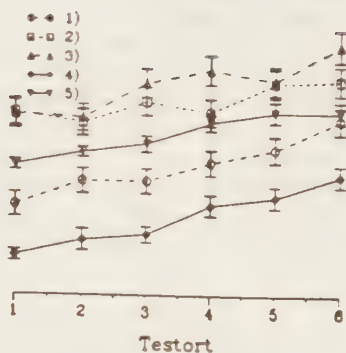


Bild 5.4.22: Einfluß des Abstandes Fixationspunkt - Testort auf die Reaktionszeiten bei Testpositionen 1..6. Kontrollmessung ohne Induktion. Testzeiten liegen zufällig verteilt im Zeitintervall [1, 3] Sekunden nach dem IVI Startton. Bewegungen nach rechts. Restliche Parameter wie bei Bild 5.4.19. Legende: 1) Test statisch (Aufblenden), VP = CS; 2) Testmaskentyp I, VP = CS; 3) Testmaskentyp II, VP = CS; 4) Test statisch, VP = TS; 5) Maskentyp II, VP = TS.

In die Mittelwertbildung der Reaktionszeiten gehen neben den Werten aus dem Intervall [120, 450]ms bei Kontrollmessungen bzw. [150, 500]ms bei Versuchen mit Induktionsbewegung nur 30 der insgesamt 44 Werte pro Parameterkombination ein. Die sieben höchsten und niedrigsten Zeiten der Verteilung werden vernachlässigt, da sie nicht wesentlich zur Verteilung beitragen und nur die Fehlerbreite erhöhen. Der Fehler des Mittelwertes bleibt damit bei etwa 1-3%.

5.4.2.3 Ort- Zeitdarstellung

Im ersten Experiment wird der Einfluß des Testabstandes vom Fixationspunkt untersucht. Die Induktionsmaske ist dabei zu Null gesetzt, während der Testkontrast maximal 50% beträgt. Bild 5.4.22 zeigt die Reaktionszeiten für die verschiedenen Maskentypen bei den Testorten 1..6 nach Bild 5.4.19 ($F_{1..F_6}$). Die Testzeitpunkte liegen zufällig verteilt im Intervall [1, 3] Sekunden nach dem Startton des IVI.

Der Anstieg der Reaktionszeit mit dem Abstand der Testpositionen vom Fixationspunkt ist fast immer linear und beträgt maximal ca. 20ms, bei statischem Testreiz sind die Unterschiede noch etwas höher. Die absolut niedrigsten Werte erreichen beide Versuchspersonen bei Tests ohne Bewegung. Die Unterschiede zwischen den Maskentypen I und II (Quadrat und Dreieck) sind bei CS sehr gering und lassen sich auf Tagesformschwankungen zurückführen, so daß die Form der Testmaske für die Ergebnisse nicht von ausschlaggebender Bedeutung ist.

Weitere Kontrollexperimente untersuchen neben den Tagesformschwankungen auch die Einflüsse von zwei Reaktionszeittasten für Bewegungen nach rechts und links, sowie eine optimale Anpassung der Testmaskenkontrastwerte bei steigender Exzentrizität der Testposition. Bild 5.4.23a) für Bewegungen nach rechts und Bild 5.4.23 für Bewegungen nach links fassen die Ergebnisse zusammen.

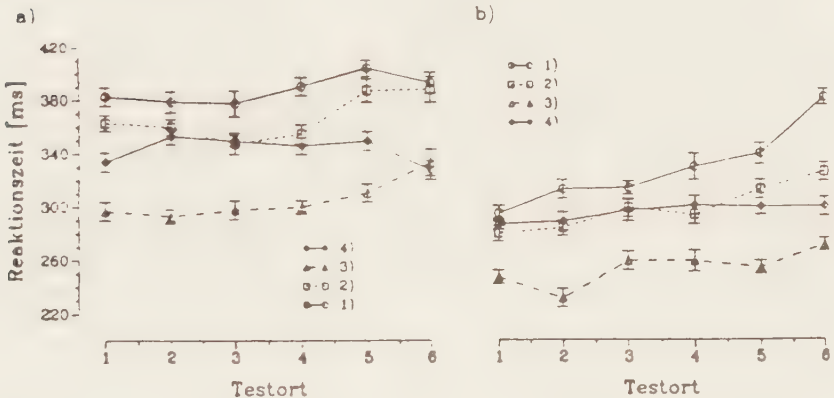


Bild 5.4.23: Kontrollexperimente zu: Tagesformschwankungen, Reaktionszeittasten und Testmaskenkontrastanpassung. Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testort 1..6. Keine Induktionsbewegung. Zufällige Mischung der Tests mit Bewegungsrichtungen links und rechts. Testmaskenkontrast bei 1..3: 20%. Restliche Parameter wie in Bild 5.4.22. VP = CS.

- 1) : Messung vom 25.8.86, 16^{39h}
- 2) : Messung vom 26.8.86, 10^{16h}
- 3) : nur eine Reaktionszeittaste für beide
: Bewegungsrichtungen. 26.8.86, 11^{48h}
- 4) : Testmaskenkontrastanpassung, getrennt für
: Bewegungen nach rechts und links, ca. 20% über
: der jeweiligen Kontrastschwelle, siehe Bild 6.2.3,
: 26.8.86, 14^{00h}

a) Testobjektbewegung nach rechts

b) Testobjektbewegung nach links

Bewegungen in Richtung Fixationspunkt (nach links) besitzen ca. 40-50ms niedrigere Reaktionszeiten als in Richtung steigender Exzentrizität. Wie schon bei den Verschiebungsschwellenexperimenten zeigt sich der Einfluß der retinalen Exzentrizität auch auf die Reaktionszeiten. Generell benötigt die Versuchsperson für den Richtungsentscheidungsprozeß ca. 40ms. Bei der Verwendung von nur einer Reaktionstaste sind die mit Abstand niedrigsten Antwortzeiten zu erreichen. Zwei Antworttasten haben die hier nicht erwünschte Vermischung der Reizunsicherheit und der Antwortunsicherheit zur Folge (siehe auch BARBER, 1972). In allen folgenden Versuchen wurde nur eine Taste zur Aufnahme der Antwort benutzt, da allein der Reaktionszeitprozeß interessiert und keine Entscheidungsprozesse, deren Einfluß auf die Induktionseffekte unbekannt ist.

Im Gegensatz zum linearen Anstieg der Reaktionszeiten in Bild 5.4.22 zeigen sich bei niedrigen Testkontrasten und bei der Exzentrizität angepaßten Kontrasten nur geringe Abhängigkeiten vom Testort. Die Unterschiede zwischen festen und variablen Testkontrasten liegen immer innerhalb der möglichen Tagesformschwankungen der Versuchsperson. Die Größe dieser Formschwankungen läßt sich anhand der Meßkurven aus Kreis- und Quadratsymbolen auf 20-40ms abschätzen. Ein Ausgleich der Variationen ist aufgrund der völlig unterschiedlichen Parameterwahl zwischen Kurventyp 1), 2) und 3) oder 4) nicht möglich (Bild 5.4.23). Nur ein Experiment mit gleichzeitigen Tests aus allen Parameterkombinationen kann hier Abhilfe schaffen. Da auch die Kontrastschwellen tageszeitlichen Schwankungen unterworfen sind, die nicht unbedingt mit den Reaktionszeiten gekoppelt sein müssen, sind diese Meßresultate nur sehr schwierig korrekt zu interpretieren. Alle folgenden Experimente benutzen deshalb für jeden Testort den gleichen Kontrastwert. Eine Reaktionszeitmessung in der Nähe der Kontrastschwelle unterläuft auch das eigentliche Ziel dieser Meßart: Messungen der Reaktion auf eindeutig überschwellige Reize.

Festzuhalten bleibt jedoch der markante Unterschied in den Bewegungsrichtungen nach rechts und links, der in Bild 5.4.24 für die Versuchsperson KG bei einem über alle Testorte konstanten Kontrast von 16% nochmals dokumentiert ist. Bewegungen nach links lassen die Reaktionszeiten mit wachsenden Exzentrizitäten ansteigen. Bei Bewegungen nach rechts zeigt sich das Ansteigen erst bei größerem Abstand vom Fixationspunkt. Davor sind die Antwortzeiten konstant.

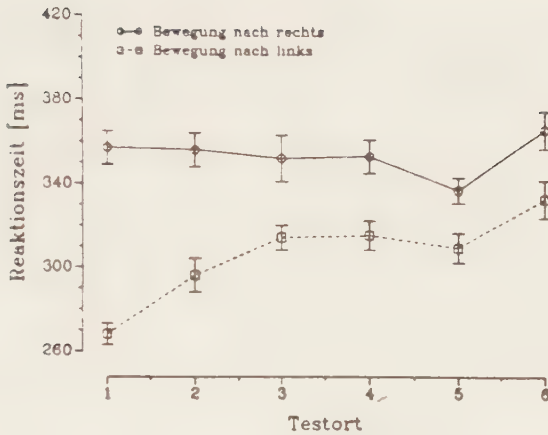


Bild 5.4.24: Reaktionszeiten auf das Testobjekt in Abhängigkeit vom Testort. Keine Induktionsbewegung. Kontrast der Testmaske für jeden Ort konstant 16% (ca. 2 x Schwellenkontrast bei kleinen Exzentrizitäten). Zufällig verteilter Startzeitpunkt des Testobjekts (Intervall [1, 3] Sekunden). Restliche Parameter wie in Bild 5.4.19. VP = KG.

Die Differenz der Reaktionszeiten für Bewegungen nach rechts und links beträgt am Testort 1 erstaunliche 90ms. Mit wachsendem Abstand von der Fixationsmarke geht der Unterschied auf ca. 30ms zurück und bleibt dann konstant (Testorte 5 und 6).

Die Abhängigkeit der Reaktionszeiten vom Testzeitpunkt bei jeweils festem Testort untersucht ein weiteres Experiment. Die Resultate mit und ohne Induktionsreiz zeigt Bild 5.4.25. Auf der Abszisse sind die Testzeitpunkte nach dem Induktionsende aufgetragen. Die Dreiecksymbole markieren die Ergebnisse der Kontrollmessung ohne Induktionsbewegung. Dabei ist einfach nur der Kontrast der Induktionsmaske auf 0% gesetzt. Der zeitliche Versuchsablauf stimmt mit dem Test mit Induktion überein. Die Entfernung des Testortes vom Fixationspunkt beträgt in allen Fällen 0.47° (Ort 2, Kreis) oder 0.71° (Ort 3, Quadrat). Die beiden Testzeitpunkte an denen $V_i = X_i/T_i$ ($i=2,3$) erfüllt ist, markieren die gestrichelte und die durchgezogene Linien in Teilbild a). Die Reaktionszeiten variieren im Experiment mit Induktionsreiz (Kreis und Quadrat) von 240ms bis 400ms. Etwa 500ms nach dem Ende der Induktion erreichen die Antwortzeiten einen Wert von 250ms, der sich auch mit größer werdenden Zeitabständen nicht mehr ändert. Auf Objektbewegungen, die unmittelbar nach der Induktionsphase getestet werden, reagiert die Versuchsperson nur sehr langsam. Die Induktion verschlechtert, auch im Vergleich zur Messung ohne Induktion (Dreiecke), die Wahrnehmung für Tests, die kurz nach

Induktionsende erfolgen. Erst 500ms nach der Induktion wird ein konstant niedriger Reaktionszeitwert erreicht. Die Daten der Kontrollmessung können dieses niedrige Niveau nicht ganz erreichen. Hier verbessert sich die Erkennbarkeit der Testobjektbewegung durch den Induktionsreiz. Die nicht ganz konstanten Werte der Messung ohne Induktion lassen auf eine vorhandene Erwartungshaltung der Versuchsperson schließen (trotz 20% Blanktests), die mit wachsendem Zeitabstand vom Testbeginn ansteigt und eine Erniedrigung der Reaktionszeiten zur Folge hat. Zunächst liegt die Aufmerksamkeit in linken Bildteil, da ein Induktionsbewegung erwartet wird. Je länger die VP wartet, desto unwahrscheinlicher wird die Induktionsbewegung und der Bereich der Aufmerksamkeit wandert in die rechte Bildhälfte und reduziert dadurch die Reaktionszeiten (siehe auch SHAW, 1978; SHULMAN, 1979).

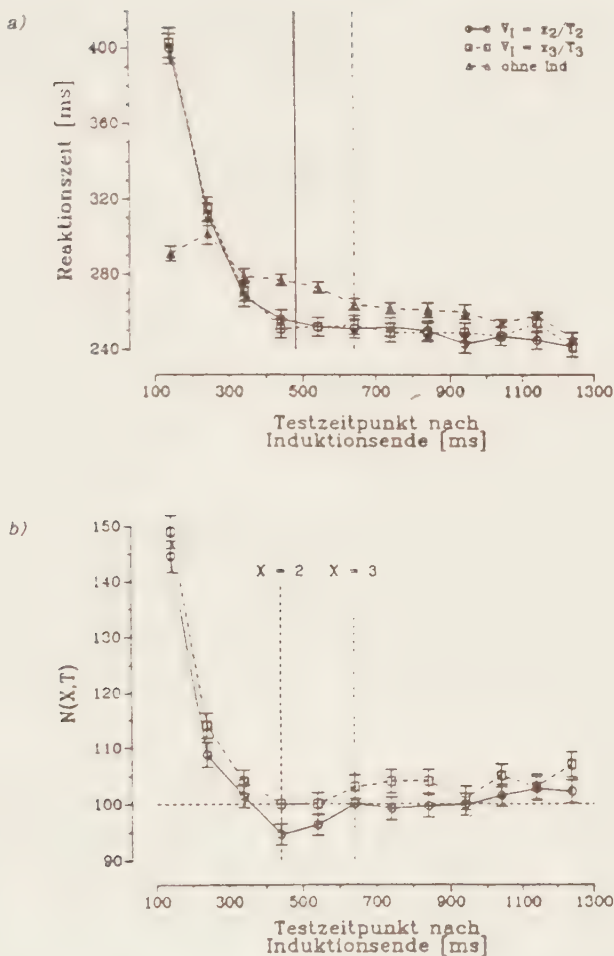


Bild 5.4.25: Abhängigkeit der Reaktionszeit vom Testzeitpunkt nach dem Induktionsende. Kreise: Testort 0.47° (Ort 2) vom Fixationspunkt entfernt. Quadrate: 0.71° (Ort 3). Senkrechte Linien: Testzeitpunkt erfüllt Gleichung $V_1 = X_1/T_1'$, $i=2$, $j=4.4$ (durchgezogene Linie), $i=3$, $j=6$ (gestrichelte Linie). Kontrast des Objekts 50% (Induktion und Test). Restliche Parameter wie in Bild 5.4.19. VP = CS. (Bemerkung: T_1' bezeichnet hier Testzeitpunkte, die nicht direkt zu den Zeitpunkten $j=1.6$ korrespondieren. Testort 2 und 3 jedoch entsprechen den Positionen nach Bild 5.4.19).

a) ohne Normierung

b) mit Normierung von $i = 2.3$ auf den Kontrollversuch ohne Induktion und der Reaktionszeit $RZ(X_1, T_0') = 100$ (siehe Gleichung (19)).

Da die Erwartungshaltung der Versuchsperson natürlich auch im Induktionsexperiment gegeben ist, kann dieser Effekt durch Bezug der Daten auf den Kontrollversuch, herausgerechnet werden. Teilbild b) zeigt die Ergebnisse nach einer Normierung N auf den Kontrollversuch ($V_1 = 0$) und auf $RZ(X_3/T_6) = 100$. Also:

$$N(X_1, T_6', T_k') = \frac{\left[\frac{RZ(V_1=1.5, X_1, T_k')}{RZ(V_1=0, X_1, T_k')} \right]}{\left[\frac{RZ(V_1=1.5, X_3, T_6')}{RZ(V_1=0, X_3, T_6')} \right]} \cdot 100 \quad (19)$$

mit $k=1,...,12$, $l=1,2$ und $T_1',...,T_{12}' = 140,240,...,1240$ [ms], wobei hier sowohl mit X_3 und T_6' als auch X_2 und T_4' $V_1 = X_3/T_6' = 1.5^*/s$ erfüllt ist. $RZ(P_1,...,P_n)$ steht für den Reaktionszeitwert bei der Parameterkombination $P_1,...,P_n$. Beim Kontrollversuch erübrigt sich eine Differenzierung gemäß $V_1 = X_2/T_4$ oder X_3/T_6 , da keine induzierende Bewegungsgeschwindigkeit existiert.

Die gestrichelten Linien markieren die Normierungen. Ort- Zeitkombinationen oberhalb 100 erkennt die Versuchsperson schlechter als Ort 3 und Zeitpunkt 3 (nach Bild 5.4.19), unterhalb ist die Wahrnehmung der Testbewegung verbessert. Testzeitpunkte kleiner als 640ms (Zeitpunkt 3) bzw. 440ms (Zeitpunkt 2) bedeuten eine positive Beschleunigung des Objekts unter dem verdeckenden Maskenteil, größere Werte eine Abbremsung der Bewegung. Die Größe N läßt sich demzufolge auch als Maß für die Erkennbarkeit eines Reizes betrachten. Die Marke 100 dient als Referenzwert.

Der Kurvenverlauf in Bild 5.4.25b) zeigt, daß etwa 200ms vor dem Zeitpunkt mit $V_1 = X_3/T_3$ eine Verbesserung der Erkennbarkeit der Testobjektbewegung einsetzt, die ihr Maximum ca 440ms nach dem Induktionsende erreicht. Nach dem Normpunkt kann man keine Beeinflussung durch die Induktion beobachten. Erst 400ms später ist ein leichter Anstieg zu verzeichnen. Testzeitpunkte, die zeitlich dem Induktionsende sehr nahe kommen (240ms, 140ms), erfahren sichtlich höhere relative Schwellenwerte. Sie übersteigen den Erkennbarkeitsgewinn direkt vor dem Normpunkt um das 8-fache. Im Fall des Testortes 2 (Quadrate in Bild 5.4.25 b)) existieren keine Schwellen, die unter den Normierungspunkt reichen. Die Werte nach dem Normpunkt liegen geringfügig über denen der Kurve für $X = 3$ (Kreise) und variieren stärker. Dies ist auch auf die nicht exakt durchführbare Normierung zurückzuführen, da $X_2/T_4' \neq X_2/T_2$ ist. Die Differenz der Zeiten beträgt aufgrund der experimentellen Auswahl der Testzeitpunkte ca. 10%.

Im Folgenden werden die Testorte und Zeitpunkte gemäß den Bezeichnungen aus Bild 5.4.19 benutzt. Für jede Testposition $X = 1..6$ existieren dazugehörige Testzeiten $T = 1..6$ (siehe auch Bild 5.4.19). So bezeichnet z.B. T_3 ($T = 3$) den Testzeitpunkt am Ort X_3 ($X = 3$), wobei die Bedingung

$V_i = X_i/T_i$, d.h. beschleunigungsfreie Balkenbewegung, erfüllt ist. Von besonderem Interesse sind nun Kombinationen von X_i und T_j mit denen $V_i = X_i/T_i$ nicht mehr gilt: $i \neq j$. So kann z.B. ein Test zum Zeitpunkt $T = 4$ für den Ort $X = 4$ am Ort $X = 6$ erfolgen. Das bedeutet, daß in diesem Fall, unter der Annahme einer kontinuierlichen Weiterführung der Induktionsgeschwindigkeit V_i hinter der Maske, der Testreiz für den Ort 6 vorzeitig erfolgt ist, nämlich bereits zum Zeitpunkt des Ortes 4. Umgekehrt erscheint der Testreiz für $T = 6$ und $X = 4$ am Ort 4 zu spät. Die Bewegung des Objekts ist damit nicht beschleunigungsfrei. Äquivalent zur Darstellung der Funktionenschar $X_i(T_j)$, $i,j=1..6$, ist natürlich auch die Umkehrung $T_j(X_i)$, $i,j=1..6$, in der zu festen Zeitpunkten T_j an allen Testorten X_i , $i=1..6$, der Reiz dargeboten wird. Es entstehen damit insgesamt 36 Ort- Zeitkombinationen. Die Auswertung der Reaktionszeitdaten RZ erfolgt mit der Normierung:

$$N(X_i, T_j) = \frac{RZ(P_1, \dots, P_n, X_i, T_j)}{RZ(P_1, \dots, P_n, X_i, T_i)} \cdot 100 \quad (20)$$

für alle $i,j=1..6$. Die $P_1..P_n$ stehen für weitere Versuchsparameter. An jedem Ort X_i (i fest) werden alle Zeitpunkte T_j ($j=1..6$) mit dem korrekten Reaktionszeitwert entsprechend der Induktionsgeschwindigkeit $V_i = X_k/T_k$ ($k=1..6$) verglichen. Normierungswerte, die größer als 100 sind, zeigen eine Erniedrigung der Empfindlichkeit gegenüber der für die gewählte Induktionsgeschwindigkeit richtigen Darbietung von Reizort und Zeitpunkt an. Werte kleiner 100 stehen für eine Verbesserung der Wahrnehmungsempfindlichkeit. Damit ist es nun möglich, die verschiedenen experimentellen Varianten einander gegenüberzustellen, und die relativen Veränderungen der Empfindlichkeiten miteinander zu vergleichen.

In den einzelnen Teilbildern von Bild 5.4.26 sind jeweils die Werte der Normierung $N(X,T)$ über den 6 verschiedenen Testpositionen aufgetragen. Alle Meßwerte eines jeden Teilbildes sind zu festen Zeitpunkten T_j , $j=1..6$, gemessen. Einen weiteren Parameter in den Diagrammen bildet die Bewegungsrichtung des Testreizes. Da die induzierende Objektbewegung immer im linken Bereich des Gesichtsfeldes von links nach rechts führt (siehe Bild 5.4.19), werden Testbewegungen nach rechts als gleichsinnig (Kreise), Bewegungen nach links als gegensinnig (Quadrate) zur Induktion bezeichnet. Die gestrichelte horizontale Linie markiert den Bezugspunkt der Normierung für $V_i = X_i/T_i$ mit $i=1..6$ in den Teilbildern a)–f). Die Fehlerbalken berechnen sich über die Fehlerfortpflanzung in Gleichung (20) und liegen, da die Mittelwerte aus den Reaktionszeiten um 1–2% schwanken, etwa bei 2%.

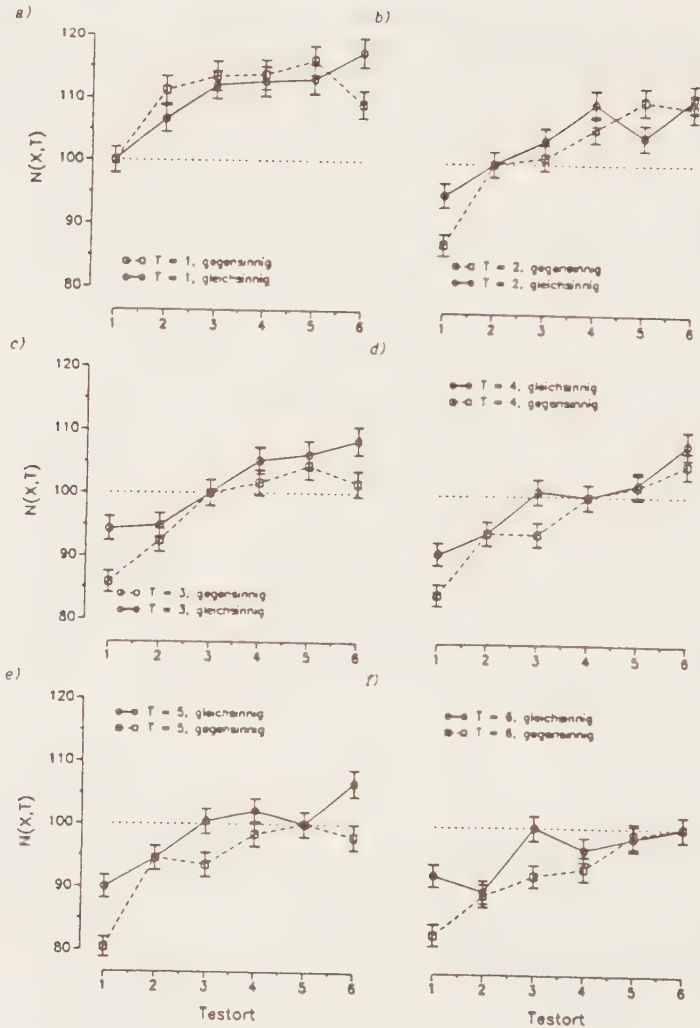


Bild 5.4.26: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testort bei jeweils festem Testzeitpunkt. Induktionsbreite 1.33° . Geschwindigkeit $1.5^\circ/\text{s}$. Bewegungsrichtung der Induktion nach rechts. Testbewegungsrichtung nach rechts (gleichsinnig): Kreise. Testbewegungsrichtung nach links (gegensinnig): Quadrate. Maskentyp I. Restliche Parameter wie in Bild 5.4.19. Die gestrichelte horizontale Linie markiert den Bezugspunkt der Normierung für beschleunigungsfreie Objektbewegungen mit korrekten Testorten X_i und Zeitpunkten T_i , $i=1..6$ in a)-f). VP = CS.

In allen Diagrammen fällt auf, daß jeweils die Testreize an Testorten vor der korrekten Position die Empfindlichkeit absenken und an Orten nach dem Bezugspunkt anheben. Das bedeutet also, daß der Induktion näherliegende Testorte eine Steigerung ihrer Empfindlichkeit erfahren, obwohl der Testreiz jeweils zu spät für die Interpretation einer konstanten Objektbewegung erscheint. Ein Vergleich der einzelnen Teilbilder zeigt, daß, je größer der jeweilige Abstand Induktion- Testort ist, desto mehr reduziert sich von Teilbild zu Teilbild die Wahrnehmungsschwelle für die späten Testzeitpunkte. Bei weiter entfernten Orten verringert sich die Empfindlichkeit auf vorzeitige Testreize. Die Steigungen aller Kurven sind in etwa gleich und lassen einen einheitlichen Prozeß vermuten, der die örtlichen und zeitlichen Reizbedingungen synchron verarbeitet. Unterschiede in den Kurven für gleich- und gegensinnige Bewegungsrichtungen sind sehr gering. Es läßt sich bei einer gegensinnigen Bewegung nur eine etwas stärker ausgeprägte Empfindlichkeitserhöhung für induktionsnahe Testorte und eine im Vergleich zum gleichsinnigen Testreiz geringfügig bessere Empfindlichkeit bei Testorten nach der korrekten Position feststellen. Die relativen Empfindlichkeitserhöhungen und -erniedrigungen bewegen sich, bezogen auf den Normierungspunkt, um die 20%.

Die Diagramme in Bild 5.4.27 zeigen die Resultate von Bild 5.4.26 mit dem Testort als Parameter und dem Testzeitpunkt auf der Abszisse. Betrachtet werden also die 6 möglichen Testzeitpunkte an einem jetzt jeweils festen Ort X_1 . Im Vergleich mit Bild 5.4.26 lassen sich analoge Aussagen den Kurven entnehmen. Besonders in Teilbild 5.4.27a) und c) fällt der deutliche Unterschied für Tests nach dem richtigen Zeitpunkt zwischen Bewegungen nach rechts und links auf (gleich- und gegensinnig). Er wird jedoch durch die Art der Normierung in den anderen Teilbildern stark verwischt. Allgemein kann man festhalten, daß für jeden Ort gilt: Die Empfindlichkeit für verspätete Tests erhöht sich mit dem zeitlichen Abstand des Testzeitpunkts vom korrekten Zeitpunkt bzw. vom Ende des Induktionsreizes. Umgekehrt gilt, daß vorzeitige Tests zu einer Erniedrigung der Wahrnehmungsempfindlichkeit führen. Je größer der Zeitabstand, desto größer auch der Einfluß auf die Reaktionszeiten.

Die Resultate weiterer Experimente mit drei verschiedenen Induktionsbreiten IB (0.68° , 1.00° , 1.65°) enthalten die Bilder 5.4.28 und 5.4.29. Start der Induktionsbewegung erfolgt immer bei einer Exzentrizität von 1.89° links von der Fixationsmarke (Bild 5.4.19). Die Meßkurven zeigen die gleichen charakteristischen Empfindlichkeitsanhebungen und Absenkungen wie in den Bildern 5.4.26 und 5.4.27. Die größten Steigerungen der Empfindlichkeiten lassen sich mit der größten Induktionsbewegungsbreite erzielen. Besonders deutlich treten die Einflüsse der einzelnen Breiten in Bild 5.4.29 a) hervor. Testzeitpunkte für den Testort 1, die größer als 1 sind, erhalten eine nach der Induktionsbreite gestaffelte Empfindlichkeitserniedrigung um maximal 15%. Im Gegensatz dazu ist die Reduktion der Empfindlichkeit für die Breite 1.68° bei Testreizen, die für den jeweiligen Ort zu früh erscheinen, am geringsten (Bild

5.4.29 f)). Die Teilbilder b) bis e) zeigen im Rahmen der Meßgenauigkeit nur kleine Differenzen bei den einzelnen Induktionsbreiten.

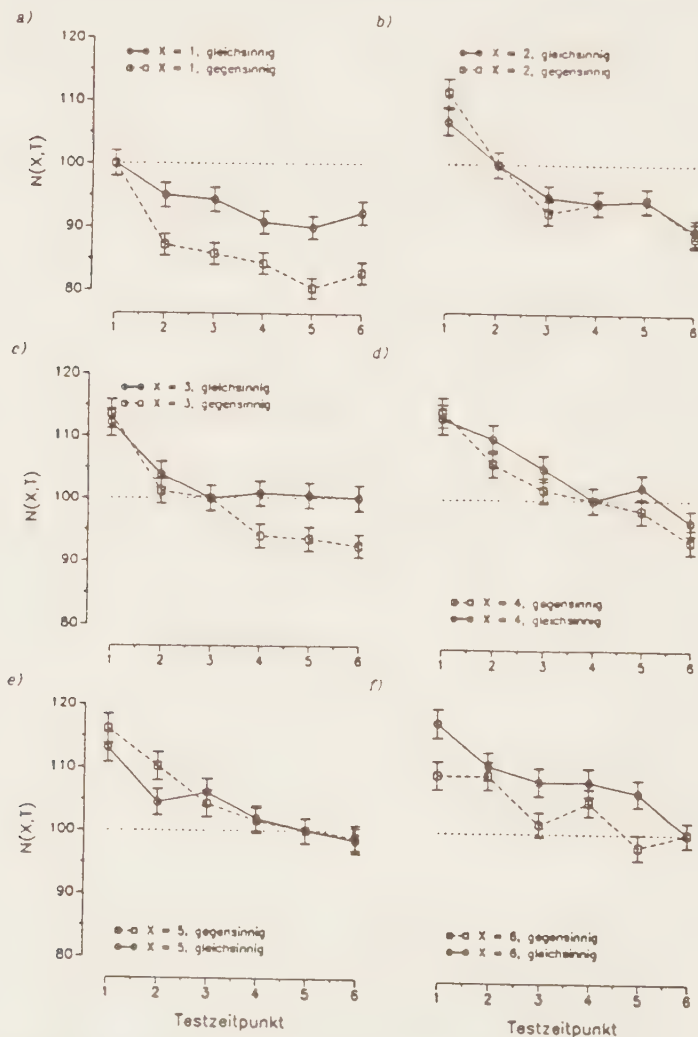


Bild 5.4.27: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testzeitpunkt bei jeweils festem Testort. Parameter wie in Bild 5.4.26.

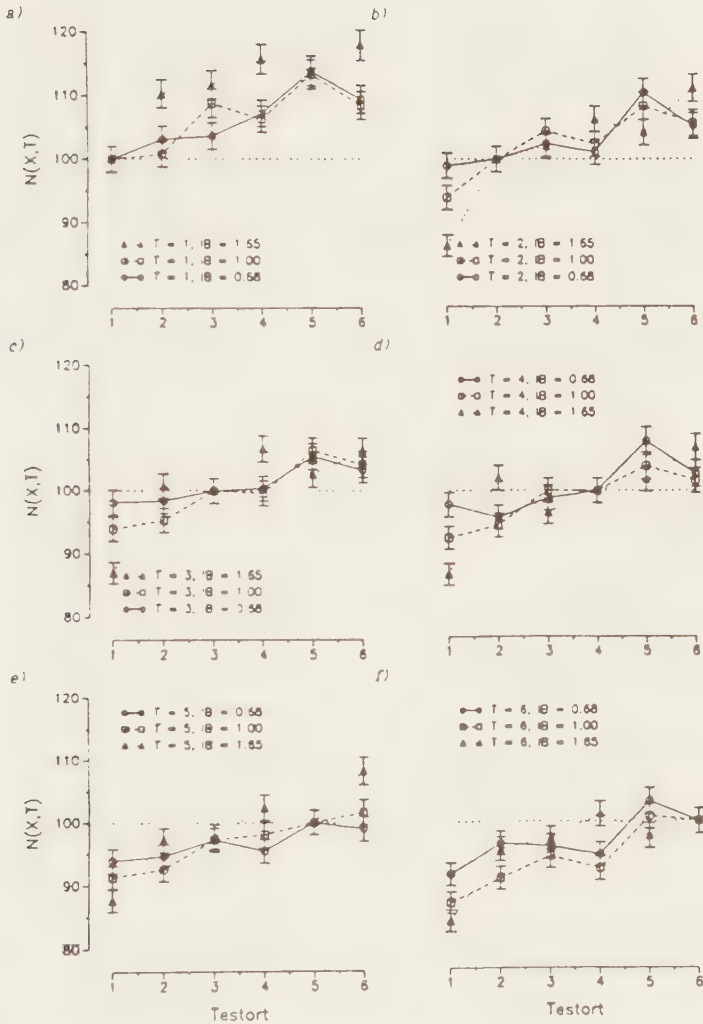


Bild 5.4.28: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testort bei jeweils festem Testzeitpunkt. IB: Induktionsbreite. Dreieck 1.65° , Quadrat 1.00° , Kreis 0.68° . Maskentyp II. Restliche Parameter wie in Bild 5.4.19. VP = CS.

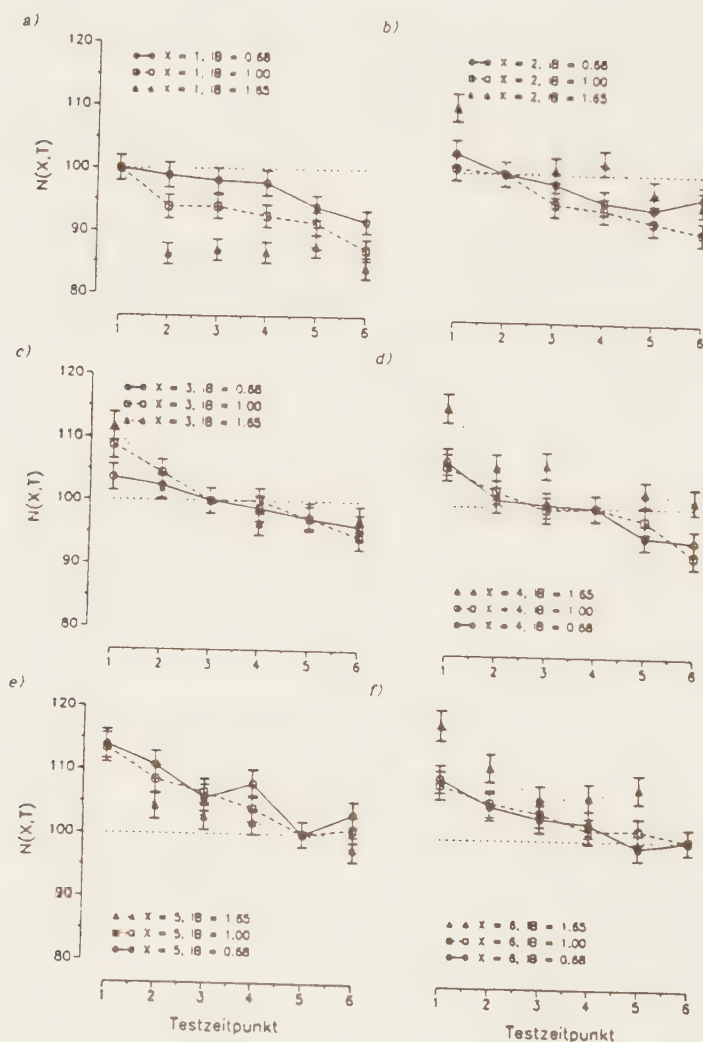


Bild 5.4.29: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testzeitpunkt bei jeweils festem Testort. Parameter wie bei Bild 5.4.28.

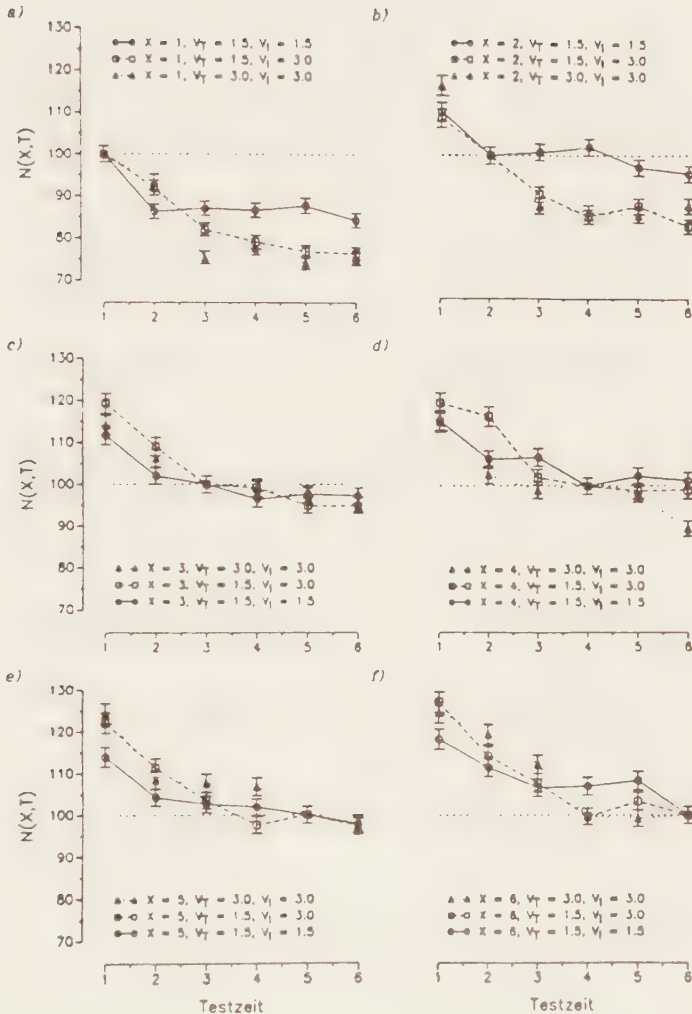


Bild 5.4.30: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testzeitpunkt bei jeweils festem Testort. V_I = Induktionsgeschwindigkeit in Grad pro Sekunde. V_T = Testobjektgeschwindigkeit in Grad pro Sekunde. Maskentyp I. Induktionsbreite 1.65° . VP = CS. (Man beachte den im Vergleich zu den vorhergehenden Bildern geänderten Ordinatenmaßstab.)

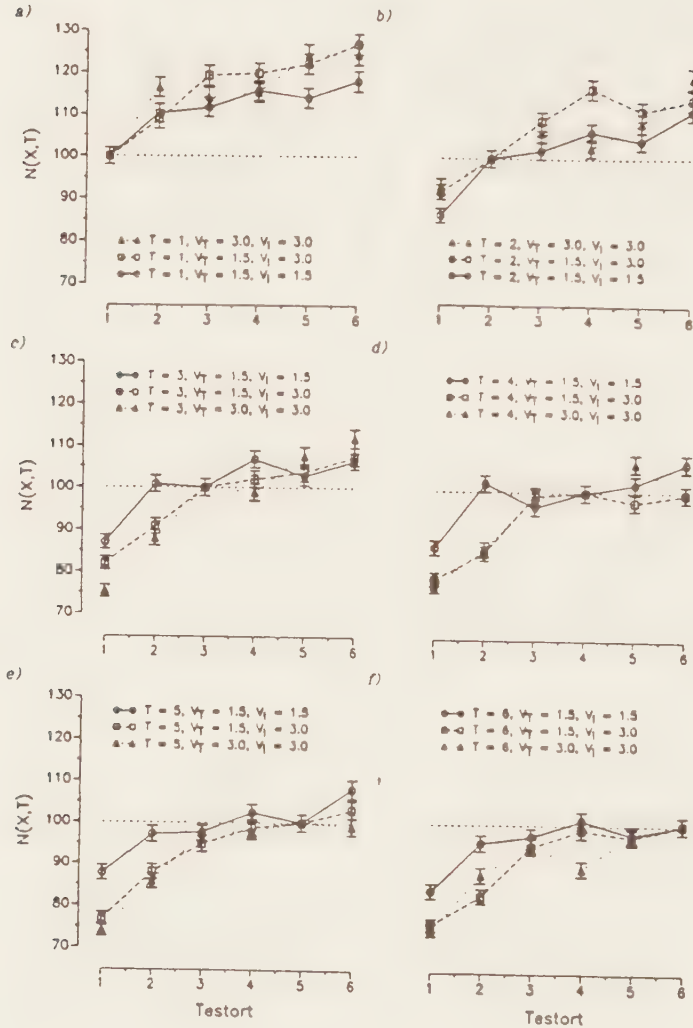


Bild 5.4.31: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testort bei jeweils festem Testzeitpunkt. Parameter wie bei Bild 5.4.30.

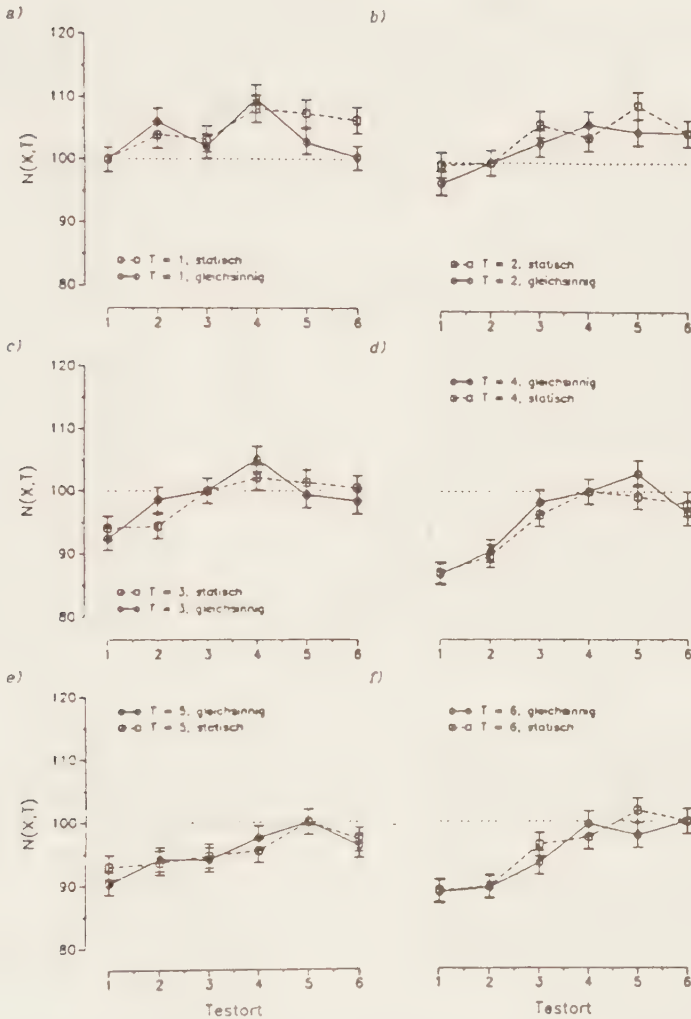


Bild 5.4.32: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testort bei jeweils festem Testzeitpunkt. Induktionsbreite 1.65°, Geschwindigkeit 1.5°/s. Maskentyp II. Im Fall mit statischem Test: Aufblenden des Objekts am Ort X_1 zur Zeit T , mittel einer Gaußflanke. Bestimmung der Reaktionszeit der VP auf das Erscheinen des Objekts im Testbereich. VP = TS.

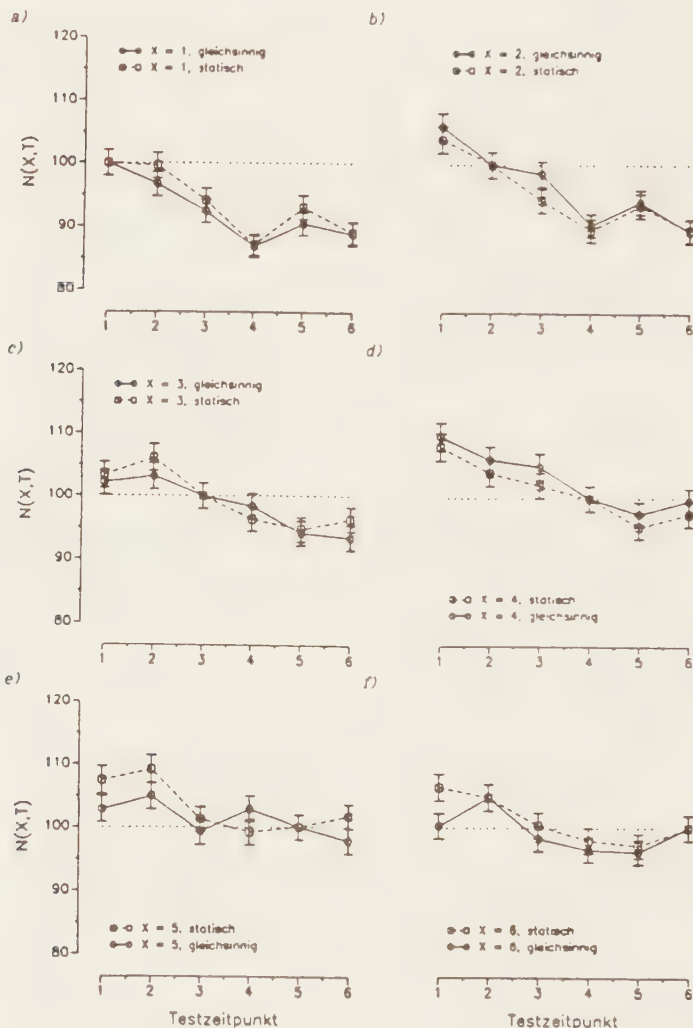


Bild 5.4.33: Variation der normierten Reaktionszeiten in Abhängigkeit vom Testzeitpunkt bei jeweils festem Testort. Parameter wie bei Bild 5.4.33.

In den Bildern 5.4.30 und 5.4.31 stehen die Kurven aus Bild 5.4.26 und 5.4.27 (Kreise) den Ergebnissen einer Meßreihe mit verdoppelter Objektbewegungsgeschwindigkeit gegenüber (Quadrat und Dreieck). Im Fall der Meßpunkte aus Dreiecken ist nur die Induktionsgeschwindigkeit heraufgesetzt ($3^*/s$). Die Effekte steigen nun deutlich an, so daß eine Erweiterung des Ordinatenmaßstabes nötig ist. Die maximalen Empfindlichkeitsdifferenzen errei-

chen beinahe die $\pm 30\%$ Marken. Neben den auch hier auftretenden typischen Kurvenverläufen fällt auf, daß auch bei halber Testgeschwindigkeit (Quadrate) kein entscheidender Unterschied zum Experiment mit gleicher Induktions- und Testgeschwindigkeit (Dreieck) besteht. Ausschlaggebend ist demnach die Geschwindigkeit während der Induktionsphase.

In einem weiteren Versuch wird obige Feststellung weiter untersucht. Falls die Testgeschwindigkeit tatsächlich keinen Einfluß auf die Höhe der Effekte besitzt, müssen auch bei Geschwindigkeit 0 Änderungen in der Wahrnehmungsempfindlichkeit nachweisbar sein. Die Geschwindigkeit 0 erreicht man im Experiment durch ein Aufblenden des Objekts am Ort X_1 zur Zeit T_j durch eine zeitliche Gaußflanke. Der Anstieg des Kontrastes sollte jedoch nicht zu langsam erfolgen, da sonst die Resultate durch die Wahrnehmungskonttrastschwelle für den Balken verzerrt werden. Die Halbwertsbreite der Gaußfunktion ist auf 0.2 Sekunden festgesetzt. Noch kleinere Werte rufen nur unerwünschte Einschwingvorgänge hervor. Die Aufgabe der Versuchsperson bleibt dieselbe: Möglichst schnelles Betätigen der Reaktionszeitaste nach dem Erscheinen des Objekts im Testbereich.

Wie Bild 5.4.32 und 5.4.33 eindrucksvoll demonstriert, läßt sich diese Unabhängigkeit von der Bewegungsgeschwindigkeit des Testobjekts tatsächlich nachweisen. Die Kurven für eine gleichsinnige Testbewegung und dem einfachen, statischen Aufblenden des Objekts decken sich in allen Teildiagrammen. Darüber hinaus gelten dieselben Regeln für eine Verbesserung oder Verschlechterung der Reaktionszeiten wie sie oben bereits aufgestellt wurden.

5.4.2.4 Diskussion der Ergebnisse des Experiments mit Balkenobjekt

Entscheidend für eine aussagekräftige Auswertung der Ergebnisse erweist sich die Einführung und Berücksichtigung der Tagesform der Versuchsperson. Erst dadurch ist ein zuverlässiger Vergleich der Daten möglich. Eine Tagesform läßt sich aber nur bei Experimenten mit identischem Parametersatz sinnvoll definieren. Die von Test zu Test zufällige Auswahl einer bestimmten Parameterkombination macht dies überhaupt erst möglich. Unterschiedliche Parametersätze, wie z.B. bei Kontrollmessungen und Versuchen mit induzierender Bewegung, sind über eine einheitliche Tagesform nicht mehr zu vergleichen, so daß wechselseitige Normierungen solcher Experimente irreführende Resultate liefern können. Deshalb ist es wünschenswert eine nötige Normierung der Meßdaten aus dem Experiments selbst zu gewinnen. Durch Gleichung (20) ist dies geschehen. Eine scheinbar äquivalente Normierungsart läßt sich durch Ersetzen von Index i im Nenner von (20) durch Index j erreichen. Hier wird zu jedem Zeitpunkt T_j (j fest) alle Orte X_i ($i=1..6$) mit dem korrekten Reaktionszeitwert verglichen ($V_i = X_k/T_k$, $k=1..6$). Bei einer solchen Normierung bleibt allerdings der nachweislich vorhandene Einfluß der retinalen Exzentrizität auf die Reaktionszeiten an den Testorten 1..6 unberücksichtigt. Erwartungsgemäß lieferte eine Auswertung solcher Datensätze keine sinnvoll interpretierbaren

Resultate und wurde nicht in die Arbeit aufgenommen. Weitere Kontrollmessungen zur Bestimmung des retinalen Einflusses wären nötig. Isolierte Vergleichsexperimente sind aber, wie oben bereits erwähnt, äußerst schwierig mit den Induktionsmessungen zu verbinden (Tagesformmittlung nicht möglich). Hinzu kommt noch, daß auch die einzelnen (festen) Zeitpunkte T_j nur bedingt miteinander vergleichbar sind, da mit Sicherheit eine psychophysikalische Verarbeitungsfunktion von der Zeit abhängig ist und die Testzeitpunkte T_j ($j=1..6$) vermutlich unterschiedlich bearbeitet.

Die Richtungsabhängigkeit der Testbewegungen tritt hauptsächlich bei den Kontrollexperimenten hervor (Bild 5.4.23, Bild 5.4.24). Die Datenauswertung der Versuche mit induzierender Bewegung zeigt nur in Bild 5.4.27 a) sehr deutliche Unterschiede für Bewegungen nach rechts und links. Der Testort 1 mit seiner Nähe zum Fixationspunkt erzeugt bei allen Testzeitpunkten T_j , $j=1..6$, einen ausgeprägten Richtungseffekt. Bewegungen nach links (gegenseitig) können viel besser erkannt werden. Alle anderen Orte weisen diese großen Unterschiede nicht auf. Die zeitliche Nähe zur Induktion läßt hier die Aufspaltung von Bewegungen nach rechts und links, wie sie die Kontrollexperimente zeigen, noch unberührt. Größere Abstände bewirken zum Teil ein völliges Verschwinden des Effekts (Bild 5.4.27 b)-f)). Ist die Induktionsbewegung abgeschlossen und im visuellen System verarbeitet, dann findet kein Aufspaltung nach Bewegungsrichtungen mehr statt. Die Bilder 5.4.32 und 5.4.33 zeigen zusätzlich noch, daß nach der Induktion selbst das bewegungsfreie Aufblenden des Testobjekts die gleichen Effekte produzieren kann. Weiter dokumentieren die Experimente mit unterschiedlichen Testgeschwindigkeiten (Bild 5.4.30 und 5.4.31), daß allein die Induktionsbewegung mit ihrer Geschwindigkeit maßgebend ist. Auch der Testmaskentyp I oder II beeinflusst die Effekte nicht (Bild 5.4.22).

Die Meßpunkte in Bild 5.4.25 b) legen eine Anpassung mit einer Funktion nahe, die einer zeitlichen Impulsantwort der Form (siehe auch ADELSON, 1985)

$$f(t) = (k_1 \cdot t)^n \cdot e^{-k_2 \cdot t} \cdot (1/n! - (k_3 \cdot t)^2 \cdot 1/(n+2)!)$$
 (21)

für $t \geq 0$ entspricht. Diese Zeitfunktion kann nicht nur als die Antwort eines Systems auf einen Eingangsimpuls betrachtet werden, sondern auch als zeitliche Gewichtsfunktion, die angibt wie ein Signal summiert werden muß, damit der aktuelle Ausgangswert des Systems zustande kommen kann. Das Experiment erlaubt es also, eine Funktion zu bestimmen, nach der die zeitlichen Eingangsreize gewichtet und verarbeitet werden. Bild 5.4.34 zeigt die mittels nichtlinearer Regression durchgeführte Anpassung der Funktionskurve von Gleichung (21) für $n = 1$. Mit k_1 und k_2 läßt sich der Maximalwert der Funktion beeinflussen. Zusätzlich bestimmt k_3 auch noch die Stärke des exponentiellen Abfalls. k_3 ist für die Größe des negativen Anteils der Funktion verantwortlich. Der Punkt (0,0) in Bild 5.4.34 besitzt das Schwellenniveau vor dem Induktionsvorgang und wurde, da er in diesem Versuch nicht getestet

werden kann, den Kontrollmessungen entnommen. Die Reaktionszeiten für die experimentellen Varianten mit und ohne Induktionsreiz decken sich etwa 1.24 Sekunden nach dem Induktionsende wieder (ca. 245ms, Bild 5.4.25 a)).

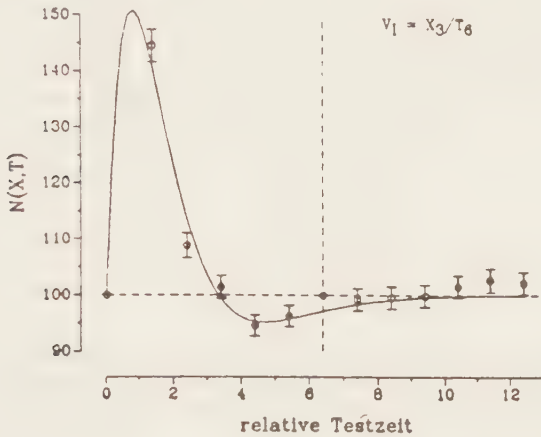


Bild 5.4.34: Resultate von Bild 5.4.25 b) mit nichtlinearer Regressionsanalyse nach Gleichung (21). $k_1 = 160.00$, $k_2 = 1.08$, $k_3 = 0.54$. Ordinate und Abszisse in relativen Einheiten der Schwellendifferenzen zum Wert für $V_1 = X_3/T_6$ und der Testzeitpunkte. Punkt (0,0) aus Kontrollversuch von Bild 5.4.25 a) (Dreiecksymbole).

Die Ergebnisse von Bild 5.4.25 legen eine Schar von Funktionen nach Gleichung (21) nahe, die je nach Abstand des Testortes vom Fixationspunkt, eine unterschiedliche Größe des negativen Funktionsanteils aufweisen (Bild 5.4.35).

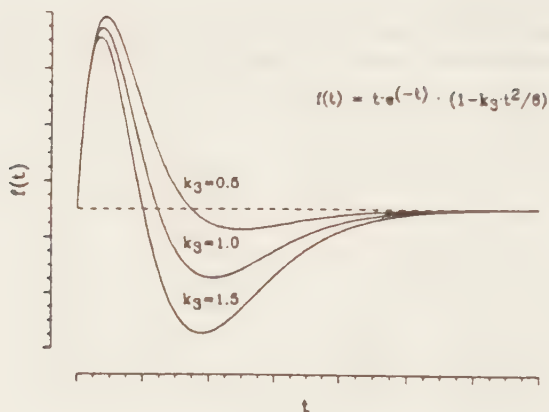


Bild 5.4.35: Kurvenschar zur Beschreibung des zeitlichen Antwortverhaltens der normierten Reaktionszeiten aus Bild 5.4.25. Parameter k_3 beeinflusst hauptsächlich den negativen Anteil der Kurven. k_1 , k_2 und n aus Gleichung (21) sind hier auf 1 gesetzt.

Mit der Variation von k_1 und k_2 läßt sich bei gleichem positiven Kurvenverlauf der negative Anteil zu null reduzieren. Dann können auch die Daten aus Bild 5.4.25b) für $X = 2$ optimal angepaßt werden. Die Güte der Anpassung der experimentellen Werte hängt stark von der Art und Zuverlässigkeit der benutzten Normierung ab, so daß es hier nur sinnvoll erscheint, den qualitativen Kurvenverlauf zu registrieren.

Eine Normierung nach Gleichung (20) zeigt sich gegenüber einer nach (19) wesentlich robuster, da sie direkt aus dem Experiment abgeleitet ist.

Die Kurven in den Bildern 5.4.26 bis 5.4.33 sind auf den ersten Blick doch etwas überraschend. Man würde erwarten, daß eine Kombination X und T mit $V_1 = X/T$ die niedrigsten Reaktionszeitwerte erzeugt (siehe Bild 5.4.36a)). Diese Punkte werden im Folgenden als korrekte Testwerte bezeichnet. Testorte oder Testzeitpunkte, die vor oder hinter dem jeweiligen Wert $V_1 = X/T$ liegen, sollten höhere Reaktionszeiten und damit verringerte Wahrnehmungsempfindlichkeiten besitzen. Bild 5.4.36 b) zeigt schematisch den prinzipiellen Kurvenverlauf der Meßergebnisse für die Orts- und Zeitvariable. Dabei wird eine direkte Kopplung von Reaktionszeiten und Empfindungsschwellen vorausgesetzt (siehe Kapitel 4.2, Gleichung (5)). Der Parameter D steht dann für den Schwellenwert der Balkenerkennung.

Alle Punkte auf einer Geraden (Bild 5.4.36) besitzen den gleichen Parameter (Ort X oder Zeit T). Ausgehend von einem Schwellenwert S_0 steigt die

Schwelle für Testorte nach dem korrekten Ort an. Davor zeigt sich immer eine Verbesserung der Empfindlichkeit. Umgekehrtes gilt bei Verwendung der Testzeit als Abszissenvariable. Bei gegebenem Testort fallen die Schwellen für einen zu späten Testzeitpunkt ab und steigen bei einem vorzeitigen Test an. Zu Bild 5.4.36 muß noch bemerkt werden, daß die S_0 -Linie nicht notwendigerweise horizontal verlaufen muß, da z.B. in der Ortsdarstellung die retinale Exzentrizität der Testreize eingehen kann.

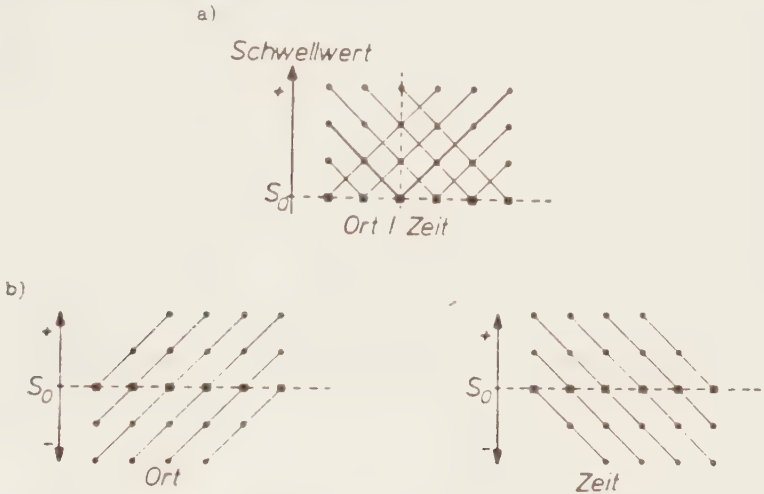


Bild 5.4.36: Schematischer Kurvenverlauf der normierten Schwellen beim Experiment mit induzierendem Objektbalken. Schwelle S_0 ist der Bezugswert. a) modellhafter Kurvenverlauf, b) Meßergebnisse in Ort und Zeit. Jede Gerade besitzt einen Parameter (Ort X oder Zeit T). Die S_0 -Linie ist aus Gründen der Übersichtlichkeit und einfacheren Vergleichbarkeit horizontal angenommen. (Ein direkter Zusammenhang zwischen Reaktionszeiten und Empfindlichkeitsschwellen ist vorausgesetzt).

Betrachtet man Bild 5.4.30 und 5.4.31 so läßt sich angenähert sagen, daß die Steigungen der Geraden aus Bild 5.4.36 b) in der Nachbarschaft der korrekten Testpunkte mit wachsender induzierender Bewegungsgeschwindigkeit ebenfalls anwachsen müssen. Der Effekt läuft für Werte, die weit von den korrekten Testpunkten entfernt sind, natürlich in eine Sättigung mit Steigung Null. Deutlich sichtbar wird dies in Bild 5.4.29 a) bei den verschiedenen Induktionsbreiten. Ein mehr oder weniger steiler Abfall zu Beginn (je nach Induktionsbreite) geht in eine konstante Schwelle über. Danach findet für sehr weit entfernte Punkte nochmals ein leichter Abfall der Schwellen statt.

Das Betrachten aller Bilder mit einer Zeitdarstellung der Ergebnisse zeigt, daß die Kurven mit den Testzeitpunkten als Variable und dem Testort als Parameter wesentlich geschlossener und damit aussagekräftiger erscheinen. Die Schwankungen der Meßpunkte in der Ortsdarstellung sind nur zum Teil eindeutig interpretierbar, und es lassen sich, neben den immer auftretenden typischen Kurvenformen, kaum quantitative Feststellungen treffen. Erst in der Zeitdarstellung treten Zusammenhänge und auch Unterschiede besser zutage. Dies weist darauf hin, daß für die zugrunde liegenden Verarbeitungsprozesse eine Beschreibung in der Zeitdarstellung zutreffender ist. Die Größe Testzeitpunkt wechselwirkt stärker mit Induktions- und Testparameter als der Testort. In den Originaldaten der Reaktionszeit spiegelt sich dies ebenfalls wieder. Bild 5.4.37 zeigt für eine Induktions- und Testgeschwindigkeit von $3.0^\circ/\text{s}$ die Reaktionszeiten, aufgetragen über dem Testort (Bild 5.4.37 a)) und dem Testzeitpunkt (Bild 5.4.37 b)). In der Ortsdarstellung weisen die Testzeiten nur kleine Schwankungen auf und dokumentieren die hier relativ geringe Abhängigkeit der Antwortzeiten von der Exzentrizität des Testreizes. Oben diskutierte Kontrollmessungen zeigen je nach Versuchsperson gelegentlich größere Exzentrizitätsabhängigkeiten. Im Rahmen der Fehler bleiben die Reaktionszeiten im Experiment mit Induktion nahezu konstant, während bei den einzelnen Testzeiten T_j , $j=1..6$, deutliche Unterschiede auszumachen sind. Die Zeitdarstellung der Meßdaten faßt dies zusammen. Die Reaktionszeitkurven variieren nur wenig und fallen exponentiell von T_1 zu T_6 hin ab.

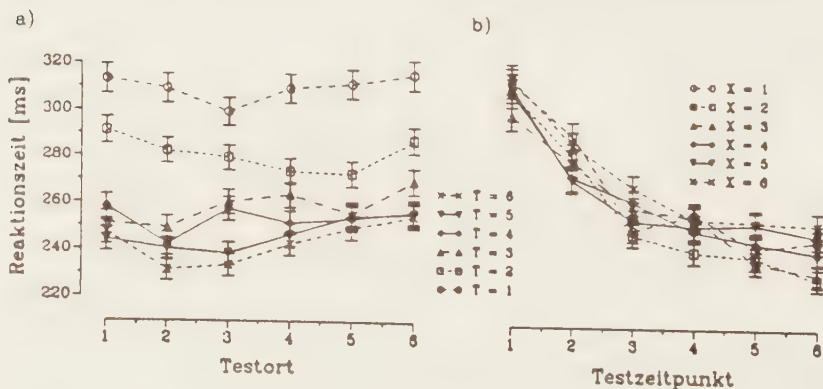


Bild 5.4.37: Reaktionszeitmessung mit Test- und Induktionsgeschwindigkeit $3.0^\circ/\text{s}$. Induktionsbreite 1.65° . Maskentyp I. Restliche Parameter siehe Bild 5.4.30. a) Ortsdarstellung mit T_j , $j=1..6$, als Parameter, b) Zeitdarstellung mit X_i , $i=1..6$, als Parameter. Erklärung der Symbole: $i=j=1$, Kreis; $i=j=2$, Quadrat; $i=j=3$, Dreieck; $i=j=4$, Raute; $i=j=5$, invertiertes Dreieck; $i=j=6$, Kreuz. VP = CS.

Bild 5.4.38 vergleicht die Mittelwerte der Kurven aus Bild 5.4.37 a) und den Mittelwerten des gleichen Experiments mit einer Bewegungsgeschwindigkeit $V_L = V_T = 1.5^\circ/\text{s}$. Große Differenzen treten bei den Testzeitpunkten 1 und 2 auf. Bei 5 und 6 sind die Unterschiede relativ klein, jedoch liegen die Reaktionszeitmittelwerte der Geschwindigkeit $3.0^\circ/\text{s}$ jetzt unterhalb den Werten für $V_{L,T} = 1.5^\circ/\text{s}$. Ein Überlappen der Werte zeigt sich bei den Testzeitpunkten 3 und 4. Der Einfluß der Geschwindigkeit wirkt besonders bei den Zeiten, die kurz hinter dem Induktionsende liegen. Die Erkennbarkeit der größeren Geschwindigkeit ist hier stark verringert. Sehr späte Testzeiten besitzen bei $1.5^\circ/\text{s}$ ebenfalls eine geringere Wahrnehmungsempfindlichkeit. Da die Reaktionszeiten für Testzeitpunkte größer als Zeitpunkt 3 einer unteren Grenze der Antwortzeiten zustreben, kann man für Tests die später erfolgen nur bedingt eine Geschwindigkeitsabhängigkeit feststellen. Die bis Zeitpunkt 2 konstante Differenz der Reaktionszeiten (ca. 20ms) wird ab Zeitpunkt 3 aufgehoben.

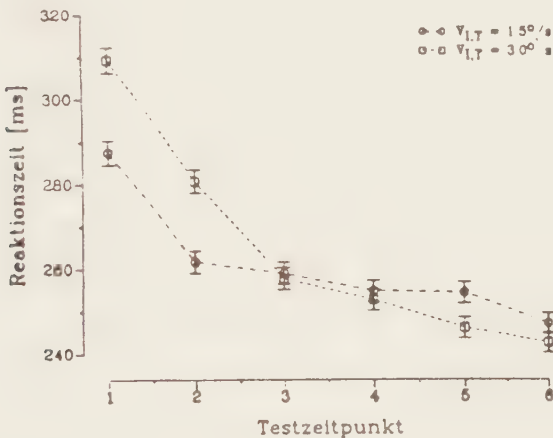


Bild 5.4.38: Reaktionszeitmittelwerte für Bild 5.4.37 a) bei zwei Bewegungsgeschwindigkeiten. Abszisse: Testzeitpunkte T_j , $j=1..6$. Induktionsbreite 1.65° . Maskentyp I. VP = CS.

Die unterschiedlichen Empfindlichkeiten bei Bewegungsrichtungen nach rechts und links treten nicht so sehr in der Orts- (Bild 5.4.26), als vielmehr in der Zeitdarstellung (Bild 5.4.27) hervor. Grundsätzliche Unterschiede in den Meßergebnissen dokumentieren sich für die Orte 1 und 6 (Teilbilder a) und f) in Bild 5.4.27) bei gleich- und gegensinnigen Induktionsbewegungen. Gleichsinnige Richtungen erfahren eine geringere Schwellenerniedrigung bei Ort 1 und eine größere Schwellenerhöhung bei Ort 6 als die jeweils gegensinnigen Bewegungen. Als Ursache hierfür läßt sich, wie schon im Verschiebungsschwellenexperiment, die in Richtung Fovea steigende Rezeptordichte heranziehen.

Bewegungen zur Fovea sind besser erkennbar, da eine pro Zeiteinheit größere Detektoranzahl überstrichen wird. Dieser Effekt läuft natürlich in eine Sättigung, da ein Mehr an Detektoren auch ein Mehr an Verarbeitung mit entsprechend zeitintensiven Prozessen zur Folge hat. Der Einfluß der Induktionsbewegung, die ja ebenfalls in Richtung retinales Zentrum läuft, ist stärker und reduziert zum einen die Empfindlichkeitserniedrigung für vorzeitige Testzeiten (Bild 5.4.27 f)), zum anderen tritt eine Verstärkung der Wahrnehmungsempfindlichkeit für zu späte Zeitpunkte ein (Bild 5.4.27 a)). Der Induktionseffekt als solcher bleibt jedoch erhalten.

Mit Induktionserniedrigung und -erhöhung sei im Folgenden die durch die Induktionsbewegung verursachte Schwellenerniedrigung und -erhöhung (Empfindlichkeitserhöhung und -erniedrigung) bezeichnet.

Der Versuch mit verschiedenen Induktionsbreiten bzw. -zeiten liefert interessante Unterschiede in Bild 5.4.29 a) und f). Eine Induktionsstrecke über 1.65° (Dreiecke) erzeugt sowohl die größte Induktionserniedrigung (Teilbild a)) als auch -erhöhung (Teilbild f)), ganz im Gegensatz zu den oben beschriebenen Verhalten von gleich- und gegensinnigen Bewegungsrichtungen. Dies beweist, daß der Parameter Induktionsbreite oder -länge von gänzlich anderer Natur für die in diesem Experiment angesprochenen Mechanismen ist als die Testbewegungsrichtung, die im gegensinnigen Fall nur eine beinahe gleichmäßige Absenkung der Empfindlichkeit bewirkt. Hier jedoch tritt eine Schwächung der Empfindlichkeit für vorzeitige Tests (Bild 5.4.29 f)) und eine deutliche Verbesserung für verspätete Testzeitpunkte (Bild 5.4.29 a)) ein. Mit kleiner werdender Induktionsbreite verringern sich die Ausschläge der Empfindlichkeiten gegenüber dem Normwert 100. Eine Breite von 0 entspricht dann dem Kontrollversuch und liefert Kurven, die sich mit der 100-Linie decken.

Bild 5.4.39 illustriert nochmal die unterschiedliche Wirkungsweise von gleich- und gegensinnigen Bewegungen und der Induktionsbreite auf die Empfindlichkeit der Wahrnehmung. Die gestrichelten (durchgezogenen) Linien in Teilbild a) stehen für gegensinnige (gleichsinnige) Bewegungen, in Teilbild b) für die Induktionsbreite $IB = 1.65^\circ$ ($IB = 0.68^\circ$). Beide Bilder stellen eine Zusammenfassung der Teilbilder a) für zu späte Tests und f) für vorzeitige Tests aus 5.4.27 und 5.4.29 dar. Dabei sind die Testzeitpunkte 1 (aus a)) und 6 (aus f)) gleichgesetzt.

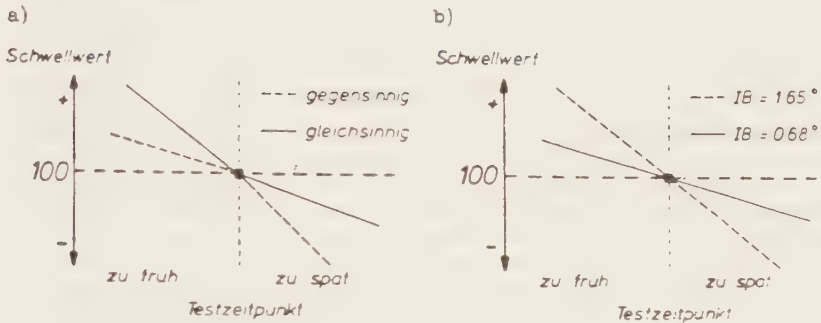


Bild 5.4.39: Schematischer Verlauf der Schwellen bei Zusammenfassung der Testzeitpunkte 1 für zu frühe (Teilbild a)) und 6 für zu späte Tests (Teilbild f)) aus den Bildern 5.4.27 und 5.4.29.

a) gleich- und gegensinnige Bewegungen

b) Induktionsbreiten 1.65° und 0.68° .

Die absolut größten Effekte lassen sich durch eine Verdopplung der Induktionsgeschwindigkeit auf $3.0^\circ/\text{s}$ erzielen (Bild 5.4.30 und 5.4.31). Damit wird die Bedeutung des Parameters Induktionsgeschwindigkeit weiter hervorgehoben. Die Testgeschwindigkeit kann in diesen Versuchsanordnungen auch auf null gesetzt werden. Trotzdem treten die gleichen Empfindlichkeitsveränderungen auf (siehe Bild 5.4.32 und 5.4.33).

Der immer ähnliche Kurvenverlauf in der Zeitdarstellung bei den einzelnen Testpositionen X_i , $i=1..6$, weist auf die gleiche Verarbeitungsart der Reize hin. Sie sind unabhängig von der (retinalen) Entfernung des Induktionsgebietes. Mit einer Induktion läßt sich über große Entfernungen hinweg die Detektorempfindlichkeit beeinflussen. Die Änderung der Empfindlichkeit ist mehr von den zeitlichen Bedingungen der Reize abhängig als von ihrer örtlichen Anordnung. Die Stärke des Induktionsreizes wird nicht nur durch die Geschwindigkeit, sondern auch durch die Reizdauer gesteuert.

6. Diskussion

6.1 Reaktionszeitmessungen

Mit den Reaktionszeitexperimenten sind weitere Aussagen über die Eigenschaften des Bewegungsinformationstransfers möglich. Die hier angewandte Methode zur Bestimmung von Reaktionszeiten zeichnet sich nämlich u.a. auch durch das benutzte Auswahlverfahren zur Bestimmung des Mittelwertes aus und ist von außerordentlicher Genauigkeit, wenn die Reaktion auf eine einsetzende Objektbewegung gemessen wird. Die Qualität der Meßmethode verdeutlicht auch Bild 5.4.3 a) und b). Hier sind sogar die unterschiedlichen Geschwindigkeiten für horizontale und diagonale Bewegungsrichtungen feststellbar. Festzuhalten bleibt, daß auch mit Reaktionszeitmessungen Wechselwirkungen zwischen Objektbewegungen in weit von einander entfernten Gesichtsfeldbereichen nachgewiesen werden können.

Als alles bestimmender Parameter der Experimente erweist sich erneut die Bewegungsgeschwindigkeit der Induktion. Der Induktionseinfluß läßt sich sogar mit der Testgeschwindigkeit $V_T = 0$ nachweisen, allerdings mit reduzierter Amplitude. Im Experiment mit zwei Objekten treten bei identischen Objektgeschwindigkeiten und optimalem Teststartzeitpunkt (gemäß $V_1 = X.T$) maximale Wechselwirkungen auf, die im Balkenversuch nur bedingt zu reproduzieren sind. Dies liegt auch in den sehr unterschiedlichen Versuchsanordnungen begründet, die nur der Untersuchung des eigentlichen Informationstransfers dienen, und auf die benutzten Objekt- und Darbietungsparameter keine Rücksicht nehmen. Größere Geschwindigkeiten verstärken die Effekte. Maßgebend ist nicht so sehr die zurückgelegte Wegstrecke oder die dazu benötigte Zeit. Es müssen nur untere Grenzwerte für Ort und Zeit zum Erkennen eines Bewegungsvorganges eingehalten werden. Verschiedene Induktionsgeschwindigkeiten bei gleichbleibender Bewegungsstrecke unterstreichen dies. Die Einflüsse der Induktionsbreite beruhen demnach nicht auf der Bewegungsstrecke, sondern auf dem Abstand zum Testort und der Exzentrizität des induzierenden Gebiets. Für eine modellhafte Beschreibung bietet sich ein Energiemaß an: Die Induktionsenergie E_I ist nach obiger Analyse eine Funktion der induzierenden Bewegungsgeschwindigkeit V_1 und der retinalen Exzentrizität ε :

$$E_I = E_I(\varepsilon, V_1) \quad (22)$$

Zur Bestimmung von V_1 wird nur eine minimale Anzahl von benachbarten Detektoren benötigt, die dann über ihre Integrations- und Verzögerungszeiten die Geschwindigkeit ermitteln und zu höheren Verarbeitungszentren leiten.

Eine Richtungsabhängigkeit der Reaktionszeiten zeigt sich bei den jeweiligen Kontrollmessungen, die sich mit zu- und abnehmender Rezeptordichte

erklären lassen. Diese Effekte sind mit dem Einführen einer induzierenden Bewegung nicht mehr nachweisbar. Der Einfluß der Induktion überschreibt den Richtungseffekt. Auch mit einer gerichteten Induktion ist keine Wechselwirkung mit den Testbewegungsrichtungen zu erzielen. Umgekehrt kann man sagen, daß die Induktionsbewegung solange nicht verarbeitet ist wie eine Richtungsabhängigkeit in den Reaktionszeiten existiert. Erst eine globale Hintergrundbewegung erzeugt wieder richtungsselektive Antworten, jedoch kann sie den lokalen Transfer von Information nicht entscheidend behindern.

Da sich beim Experiment mit bewegtem Balken für die beiden Maskentypen I und II, unabhängig von allen anderen Versuchsparametern, keine Unterschiede in den Effekten zeigen, kann man folgern, daß die Induktionswirkung unabhängig von der Dauer ($> 150\text{ms}$) der Testdarbietung ist. Mit einer induzierenden Bewegung läßt sich generell die Empfindlichkeit der Wahrnehmung, auch bezüglich statischer Objekte, steigern, wobei gleiche Induktions- und Testgeschwindigkeiten den Effekt nochmals erhöhen. Die Orts- Zeitbedingungen müssen $V_i = X_i/T$ nicht unbedingt erfüllen, damit der Effekt eintritt. Dies zeigt erneut die Unabhängigkeit des Parameters Geschwindigkeit bei der Verarbeitung bewegter Signale. Die lokale Induktion muß jedoch eine Bewegungsinformation enthalten, sonst läßt sich kein bedeutender Empfindlichkeitsgewinn erreichen. Die Ergebnisse spiegeln also mehr als nur die Folgen eines reinen Aufmerksamkeitsprozesses wieder, wie er in der Literatur diskutiert wird (LABERGE, 1986; TSAL, 1983; ERIKSON, 1985).

6.2 Balkenexperiment mit Kontrastschwellenmessung

Natürlich lassen sich aus einem Reaktionszeitversuch Aussagen über zeitliche Abläufe einzelner Prozesse gewinnen. Mit dieser experimentellen Meßvariante wird versucht die Induktionseinflüsse auch bei einer Kontrastschwellenbestimmung nachzuweisen. Das Gewicht der oben extrahierten Zeitabhängigkeiten in den bisherigen Ergebnissen soll mit dieser Meßmethode relativiert werden.

Die Vorversuche machen bereits deutlich, daß der Einsatz eines Kontrastschwellenmeßverfahrens stark von der Methode der Reizauswahl (Folge der Kontrastwerte) und der Möglichkeit einer sinnvollen Fehlerangabe abhängt. Die Schwellenbestimmung nach der Staircase-Methode, wie sie von GERBER (1979) benutzt wurde, liefert auf Grund der großen Meßfehlerschwankungsbreite nur bedingt zuverlässig interpretierbare Ergebnisse. Die Fehlergröße variiert beträchtlich von Meßpunkt zu Meßpunkt (Bild 6.2.1). Trotz dieser Schwierigkeit sind die typischen Kurvenverläufe nach Bild 5.4.36 im Ansatz auszumachen. Auf der Ordinate ist das Verhältnis $N(X,T)$ aus den Kontrastschwellenwerten $K(X_i, T_j)$, $i,j=1..5$, mit den jeweiligen Bezugsschwellen $K(X_1, T_j)$, $i=j=1..5$, aufgetragen (siehe auch Gleichung (20), Kap. 5.4.2.3):

$$N(X_i, T_j) = \frac{K(X_i, T_j)}{K(X_i, T_1)} \quad (20a)$$

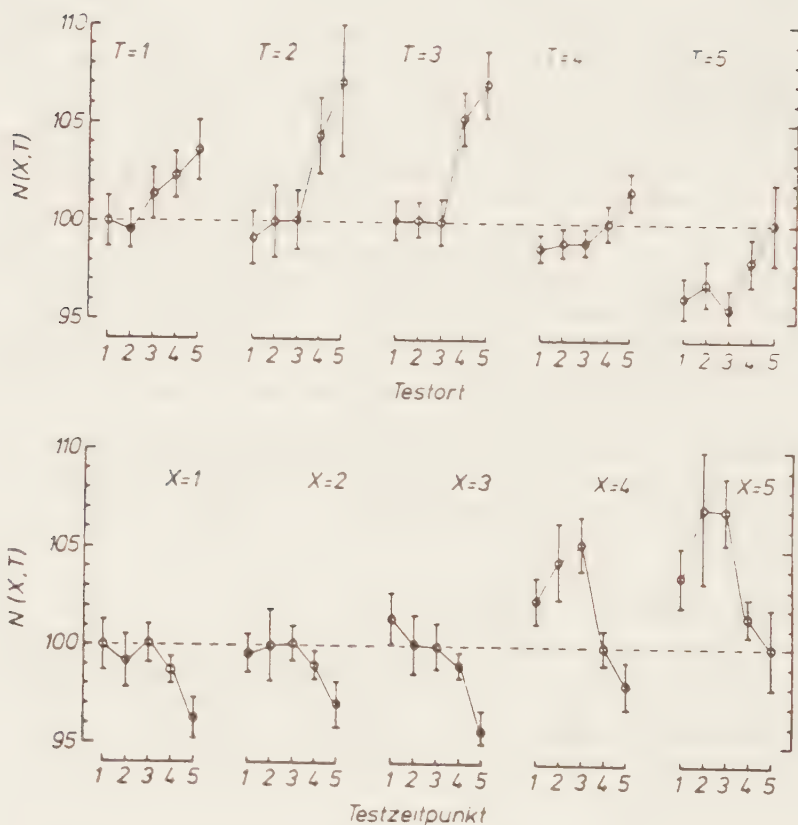


Bild 6.2.1: Variation der normierten Kontrastschwellen in Abhängigkeit vom Testort und Testzeitpunkt. Parameter analog zu den normierten Reaktionszeiten der Bilder 5.4.26 bis 5.4.33. Induktionsbreite 1.33° . Induktionsstartposition 0.69° (Die Fixationsmarke liegt in der Mitte des Induktionsbereichs). Testorte sind die Exzentrizitäten: 1.08° (1), 1.52° (2), 1.96° (3), 2.41° (4) und 2.85° (5). Bewegungsgeschwindigkeit $1.5^\circ/\text{s}$. VP = KG.

Die Wahl der Parameter entspricht in etwa den Reaktionszeitmessungen. Lediglich die Exzentrizitäten der Testorte sind größer, da der Fixationspunkt in der Mitte des Induktionsbereichs liegt. Bei fovealer Fixation des Induktionsgebietes werden maximal viele Rezeptoren überstrichen. Betrachtet man die Bewegungsvorgänge in einer Energiedarstellung, so kann hier die größt-

mögliche Induktionsenergie aufgenommen werden und man darf auf ausgeprägte Effekte hoffen.

Die Staircase-Meßmethode liefert für Kontrollmessungen mit Variation der Fixationsmarkenposition (Exzentrizitäten), der Induktionsbreite oder der Geschwindigkeiten keine zuverlässigen und sicher reproduzierbaren Ergebnisse, da die Kontrastschwellen und ihre Fehler stark von Entscheidungskriterien der Versuchsperson abhängen. Zwischen den einzig möglichen Antworten "ja gesehen" und "nein nicht gesehen" kann sich die VP weitere Stufen der Entscheidung definieren (z.B. "vielleicht gesehen") und diese dann unmotiviert wechselnd den Antworttasten zurechnen. Die Folgen für eine exakte Schwellenbestimmung sind fatal.

Wesentlich bessere Resultate lassen sich mit der oben beschriebenen Maximum-Likelihood-Methode erzielen. Hier kann die Fehlerbreite als Abbruchkriterium des Algorithmus benutzt werden. Damit muß die Versuchsperson so lange eine Meßreihe durchführen, bis alle Kontrastwerte mit der gewünschten Genauigkeit ermittelt sind.

Bild 6.2.2 enthält die mit der Maximum-Likelihood-Methode gemessenen Kontrastschwellen für die VP CS. Der Versuchsaufbau stimmt mit Bild 6.2.1 überein. Jede Kurve erfüllt die Gleichung $V_i = V_r = X_i/T_j$ mit $i = j = 1..6$. Deutliche Unterschiede weisen die Kurven nur in den Geschwindigkeiten 1.5°/s und 3.0°/s auf. Eine induzierende Bewegung erzeugt hier keine Verbesserung der Kontrastschwelle. Die Kontraste steigen lediglich mit wachsender Exzentrizität an. Der Vergleich der Teilbilder a) und b) zeigt nur geringfügige Differenzen für Bewegungen nach rechts und links.

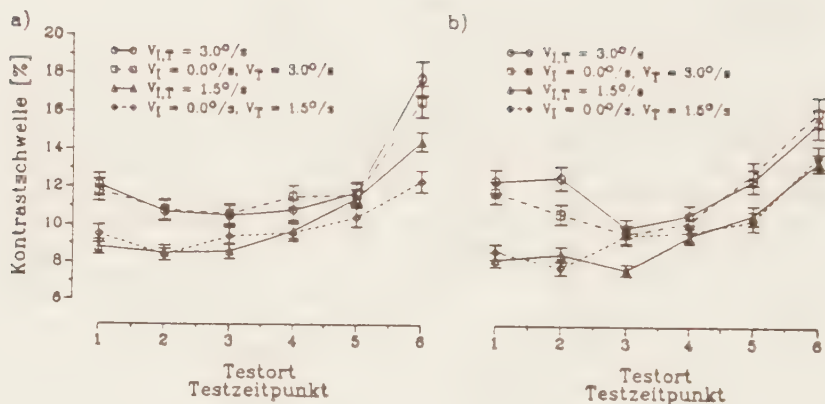


Bild 6.2.2: Kontrastschwellenabhängigkeit vom Testort und Testzeitpunkt. Induzierende Bewegung nach rechts. Testbewegungen nach rechts (a) und nach links (b). Induktionsbreite 1.33". Restliche Parameter gemäß Bild 6.2.1. VP = CS.

Daß trotz der besseren Meßmethode keine Unterschiede zwischen Bewegungen nach rechts oder links und mit und ohne Induktion auftreten, dokumentieren die Resultate einer Kontrastschwellenmessung der VP KG in Bild 6.2.3. Auch durch Meßreihen mit $V_I = X_i/T_j$, wobei $i \neq j$ ($i,j=1..6$) gilt, ist die Aussagekraft der Kurven von Bild 6.2.1 nicht zu verbessern. Eindeutige Aussagen, wie sie bei den normierten Reaktionszeitkurven möglich waren, können hier nicht getroffen werden. Ein Einfluß der induzierenden Bewegung auf die Kontrastschwellen läßt sich zwar nicht gänzlich ausschließen, ist aber mit den benutzten Methoden nicht zweifelsfrei nachweisbar. Falls ein Induktionseffekt vorhanden ist, so ist er bedeutend kleiner als bei den Reaktionszeitmessungen.

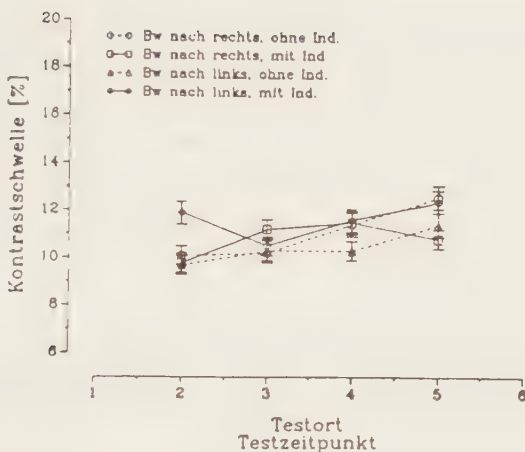


Bild 6.2.3: Kontrastschwellenabhängigkeit vom Testort und Testzeitpunkt. Geschwindigkeit $1.5^\circ/\text{s}$. Parameter wie bei Bild 6.2.2. VP = AG.

6.2 Rolle der Augenbewegungen

RASHBASS (1961) konnte einen Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit einer Bewegung und den Augenfolgebewegungen nachweisen. Der Augenbewegungsapparat antwortet in seinem Experiment getrennt auf eine gleichmäßige Objektgeschwindigkeit mit Folgebewegung und auf eine entgegengerichtete Positionsveränderung mit Sakkaden. Der geschlossene Regelkreis erschwert den direkten Zugang zu den Wechselwirkungen von Geschwindigkeit und Augenbewegungen. BAHILL (1986) gelingt die Modellierung des Systems aus experimentellen Daten mit einem offenen linearen Regelkreis.

Die Rolle der Augenfolgebewegungen läßt sich anhand der Bewegungserkennung der Zufallsmuster von CHANG (1984) gut beobachten. CHANG läßt allerdings in seiner Analyse den Einfluß der Augenbewegungen auf die Erkennung der Bewegung völlig außer acht. In dem hier durchgeführten Experiment werden der Versuchsperson abwechselnd Zufallspunktmuster der Form ABABA... und BABAB... präsentiert. Die Korrelation zwischen den Teilbildern A und B bestimmt die wahrnehmbare Bewegungsrichtung des gesamten Punktmusters. Mit der Einführung von Punkten, die die Korrelation stören, können bevorzugte Wahrnehmungsrichtungen entstehen (kooperatives Phänomen). Der Effekt ist so stark, daß auch eine willentliche Fixation der Bildmitte den Bewegungseindruck nicht verhindern kann und sofort Augenfolgebewegungen ausgelöst werden. Bei einer 50%igen Korrelation von A und B hängt die wahrgenommene Be-

wegungsrichtung von der Richtung der bewußt ausgelösten Augenfolgebewegung ab. Bild 6.3.1 enthält mit der Augenbewegungsmeßapparatur (siehe Kapitel 3.1, Bild 3.1.1: ABA) gewonnene X-T- und Y-T-Diagramme. Die Muster erzeugt der Bildgenerator (FMG). Die Versuchsperson markiert ihre Bewegungsrichtungserkennung durch einen Tastendruck auf dem IVI. Diese Erkennungszeitpunkte decken sich sehr gut mit dem Einsetzen der Augenfolgebewegung in Bild 6.3.1 (Vertikale Pfeilmarkierungen in Teilbild d)).

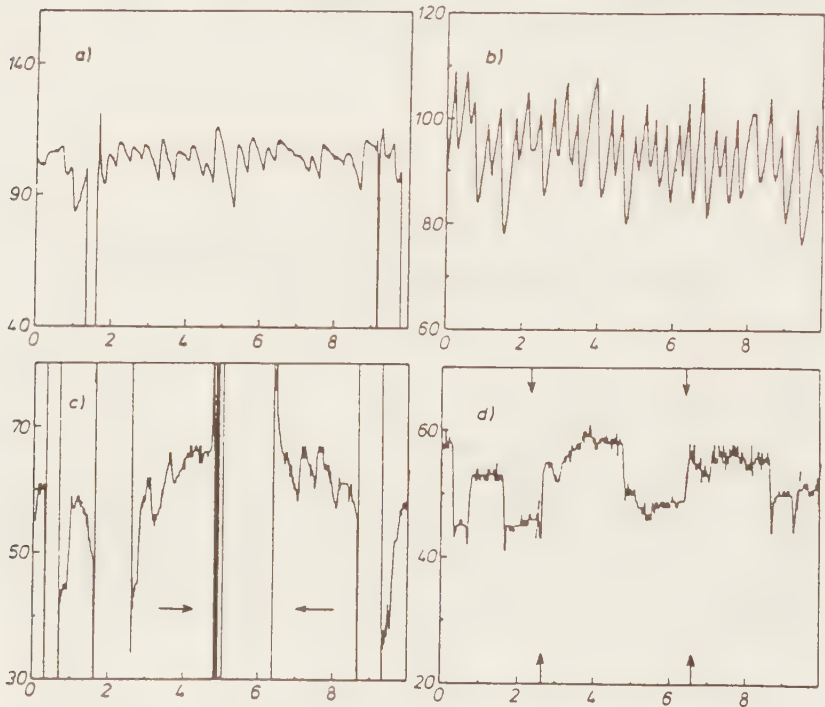


Bild 6.3.1: Aufzeichnung der Augenbewegungen beim Betrachten der Zufallsmuster von CHANG (1984). Ordinate in Monitorpixeleinheiten. Abszisse in Sekunden.

- a) X-T-Diagramm: Bewegung nach links erkannt
- b) X-T-Diagramm: Bewegung nach rechts erkannt
- c) X-T-Diagramm: Wechsel der wahrgenommenen Bewegungsrichtung nach bewußt ausgeführten horizontalen Sakkaden zu einem Zielpunkt in der Bildumgebung und zurück. Dauer: ca. 1.6 Sekunden (4.8s - 6.4s). Die horizontalen Pfeile markierten die von der VP wahrgenommenen Bewegungsrichtung der Punktmuster
- d) Y-T-Diagramm zu c). Die vertikalen Pfeile markieren den Einsatzzeitpunkt der X-Sakkaden von c) (Erläuterung siehe Text). VP = KG.

Teilbild a) und b) zeigen die Augenbewegungen für Bewegungen nach links und rechts. Steile Flanken weisen auf eine Sakkade hin, während geringere Steigungen die eigentliche Augenfolgebewegung beschreiben. Die Amplituden der Sakkaden-Folgebewegungszyklen liegen zwischen 20 und 30 Monitorpixeln. In Teilbild c) ist die Umorientierung der Folgebewegung durch bewußt ausgeführte horizontale Sakkadensprünge zu einem Zielpunkt in der Bildumgebung und wieder zurück gelungen. Das dazugehörige Y-T-Diagramm in Teilbild d) zeigt, daß ein kleiner Y-Versatz (maximal 15 Pixel) bei den Sakkadensprüngen in die Peripherie auftrat. Im Rahmen der Meßgenauigkeit bleibt die Y-Komponente der Augenbewegung während der horizontalen Folgebewegungen konstant (Zeitraum: 2.3 - 4.8 und 6.2 - 8.6 Sekunden nach dem Start der Aufzeichnung). Die Ausschläge der Kurven, die zum Teil mehr als den gesamten Wertebereich überdecken, sind bewußt ausgeführte Lidschläge der Versuchsperson. Während des Lidschlages lassen sich die zur Änderung der Richtung der Augenfolgebewegung nötigen Sakkaden in die Peripherie leichter durchführen, da die Umdrehung des von den Punktmustern erzeugten Bewegungseindrucks bei offenem Auge aufgrund der Stärke des Effekts nur selten gelingt.

In einem mit KRÄMER (1986) durchgeführten Experiment bestätigen sich die Abhängigkeiten von Augenfolgebewegungen und Bewegungswahrnehmung. Durch korrekte glatte Folgebewegungen ist es möglich, trotz sukzessiv dargebotener Musterteile, einen vollständigen visuellen Bildeindruck des Gesamtmutters zu erzeugen.

Das visuelle System ist also in der Lage eine Augenfolgebewegung auch ohne bewegtes Objekt weiterzuführen und eine Prädiktion der örtlichen und zeitlichen Objektposition durchzuführen (RÖHLER, 1986).

Mit geeigneten Augenbewegungen kann man einen, physikalisch nicht vorhandenen, Bewegungseindruck bei der Versuchsperson erzeugen. Zur Trennung von Objekt- und Augenbewegungseinflüssen wurde deshalb in den Experimenten immer auf die Einhaltung der Fixationsgenauigkeit geachtet. Da sich Objekte und Fixationsmarke nicht decken, sind durch einsetzende Objektbewegungen ausgelöste Augenfolgebewegungen, im Gegensatz zu den Adaptationsexperimenten von VEY (1984), weitgehend unterdrückt worden. Im Verschiebungsschwellenexperiment mit induzierender Bewegung (siehe Kapitel 5.3.3.1) sind häufig Testobjektbewegungen gesehen worden, die physikalisch nicht stattfinden. Durch die Induktion ausgelöste, unbewußte Augenbewegungen können hierfür verantwortlich sein. Der Bewegungskanal des visuellen Systems bereitet den Augenbewegungsmechanismus auf die Ausführung einer Bewegung vor. Nicht immer gelingt es dann der Versuchsperson den eingeleiteten Augenbewegungsvorgang willentlich zu unterdrücken. Die Folge ist eine Objektverschiebung auf der Retina, die dann als Bewegung empfunden wird.

6.4 Gaborfunktionsmessung

Gaborfunktionen (GABOR, 1946) sind seit geraumer Zeit für die Beschreibung visueller Bildeindrücke im Gespräch. Mit einer Schar solcher Funktionen lassen sich Signale örtlich und zeitlich lokal analysieren, und es entsteht so ein lokales Ortsfrequenzspektrum des Eingangssignals (MARCELIA, 1980; BASTIAANS, 1981; FISCHER, 1982; ZUCKER, 1986).

ADELSON (1985) interpretiert die Geschwindigkeit einer Objektbewegung als Orientierung im x-y-t Raum (siehe auch Kapitel 2.1). Er benutzt örtlich-zeitlich orientierte Gaborfunktionen, die als Filter zur Extraktion der Bewegungsenergie dienen. Sie besitzen nicht mehr eine rotationssymmetrische Gaußglocke als Einhüllende, sondern sind von elliptischer Gestalt mit gaußförmigen Flanken. Neurophysiologen sind schon lange in der Lage, Antworten von "simple"-Zellen abzuleiten, die sich sehr gut mit den oben beschriebenen Profilen decken. Diese Zellen produzieren eine maximale Pulsrate bei bestimmten Orientierungen von Linien und Kanten (HUBEL, 1974). Die Analyse der Antworten im Ortsfrequenzbereich zeigt, daß die Zellen eine Bandbreite von etwa einer Oktave besitzen.

Die Fourier-Transformation einer solchen elliptischen Gaborfunktion bildet im Frequenzraum ebenfalls eine elliptische Struktur mit Gaußflanken, deren Längsachse jedoch im Vergleich zur Ortsdarstellung um 90° gedreht ist.

DAUGMAN (1985) benutzt elliptische Gaborfunktionen zur Analyse von orientierungspezifischen Kortexzellen. Es gelingt ihm, die Orientierungs- und Ortsfrequenzbandbreiten der Zellantworten aus den Funktionen vorherzusagen.

Im folgenden Experiment wird der Versuch unternommen, die auf Zellebene gewonnenen Aussagen auf psychophysikalische Messungen zu übertragen und zu überprüfen. Die Frage lautet: Lassen sich mit psychophysikalischen Versuchen die bereits an kortikalen Zellen bestimmten Eigenschaften nachweisen? d.h., haben diese Zellen Relevanz für die Empfindung ?

Mit diesen Mustern kann eine Messung der visuellen Auflösungsgrenzen im Ortsfrequenzraum vorgenommen und können rezeptive Feldgrößen ermittelt werden. Da die Gaborfunktionen eine Unschärferelation für Ort und Ortsfrequenz optimal erfüllen, ist es außerdem möglich, ihre Gültigkeit am visuellen System zu überprüfen und als Maß für die Qualität der Beschreibung durch diese Funktionenschar heranzuziehen.

Das mit DERLICH (1987) durchgeführte Adaptationsexperiment bestimmt an Hand von Kontrastschwellen elliptischer Gaborfunktionen Orientierungs- und Ortsfrequenzbandbreiten (siehe auch GERBER, 1986). Die benutzten Funktionen kann man als Produkt einer zweidimensionalen Gaußfunktionen mit Sinus- Cosinusfunktionen in komplexer Darstellung schreiben:

$$g(x, y; x_m, f_x, y_m, f_y) = e^{-\pi \cdot [(x-x_m)^2 \cdot a^2 + (y-y_m)^2 \cdot b^2]} \cdot e^{-2\pi i \cdot [(x-x_m) \cdot f_{0x} + (y-y_m) \cdot f_{0y}]} \quad (23)$$

Dabei sind x und y die Ortskoordinaten. x_m und y_m bezeichnen die Lage des Figurmittelpunktes. f_{0x} und f_{0y} sind analog dazu die Koordinaten des Mittelpunktes im Frequenzraum. Definiert man die effektiven Signalbreiten zu

$$\delta x = \overline{(x - \bar{x})^2}^{1/2}, \quad \delta y = \overline{(y - \bar{y})^2}^{1/2}$$

(Querstrich steht für Mittelwert) und für den Fourierraum zu

$$\delta f_k = \overline{(f_k - \bar{f}_k)^2}^{1/2}, \quad k=x, y,$$

so läßt sich die ein- und zweidimensionale Unschärferelation aufstellen:

$$\begin{aligned} 1d: & \quad \left\{ \frac{\delta x}{\delta y} \right\} \cdot \left\{ \frac{\delta f_x}{\delta f_y} \right\} \geq \frac{1}{4} & (23) \\ 2d: & \quad (\delta x) \cdot (\delta y) \cdot (\delta f_x) \cdot (\delta f_y) \geq \frac{1}{16} & (24) \end{aligned}$$

Aus dem eindimensionalen Fall leitet sich das Verhältnis r ab:

$$r = \frac{\delta x}{\delta y} = \frac{\delta f_y}{\delta f_x} \quad (25)$$

Die Rekonstruktion eines Signals $S(x, y)$ ist dann die Summe über das Produkt aus Koeffizienten C mit der jeweiligen Gaborfunktion g (BASTIAANS, 1981):

$$S(x, y) = \sum_m \sum_{f_x} \sum_{f_y} C_{m, f_x, f_y} \cdot g(x, y; x_m, y_m, f_{0x}, f_{0y})$$

Im Experiment adaptiert die Versuchsperson 10 Sekunden auf eine vertikale elliptische Gaborfigur, deren Sinusanteil mit einem Hertz moduliert wird und die Ortsfrequenz f_{ax} besitzt. Die Testmuster bestehen aus einer Gaborfunktion mit gleicher oder um 90° gedrehten Orientierung und Ortsfrequenzen $f_{1x} < f_{2x} \dots \leq f_{ax} \leq \dots f_{nx}$. Ortsfrequenzen in y -Richtung existieren nicht. Die Schwellenbestimmung erfolgt mit der oben beschriebenen Maximum-Likelihood-Methode und der MLH-Slave Software. Die Meßpunkte für mit und ohne Adaptation interpoliert ein Satz von Gauß'schen Elementarfunktionen (Bild 6.4.1 c, d); m steht für mit, o für ohne Adaptation). Jetzt berechnen sich die Bandbreitenkurven für die relative Schwellenerhöhungen von Bild 6.4.1 a) und b) einfach aus dem Quotienten der Koeffizienten beider Kurven multipliziert mit den elementaren Interpolationsfunktionen. Die Kurven liefern mit dieser Auswertemethode reproduzierbare Werte der Bandbreiten für horizontale und vertikale Gaborellipsen, und man kann das Verhältnis r nach (25) sowie den Unschärfewert mit (23) berechnen. Bild 6.4.1 zeigt die Ergebnisse für die Versuchsperson HD.

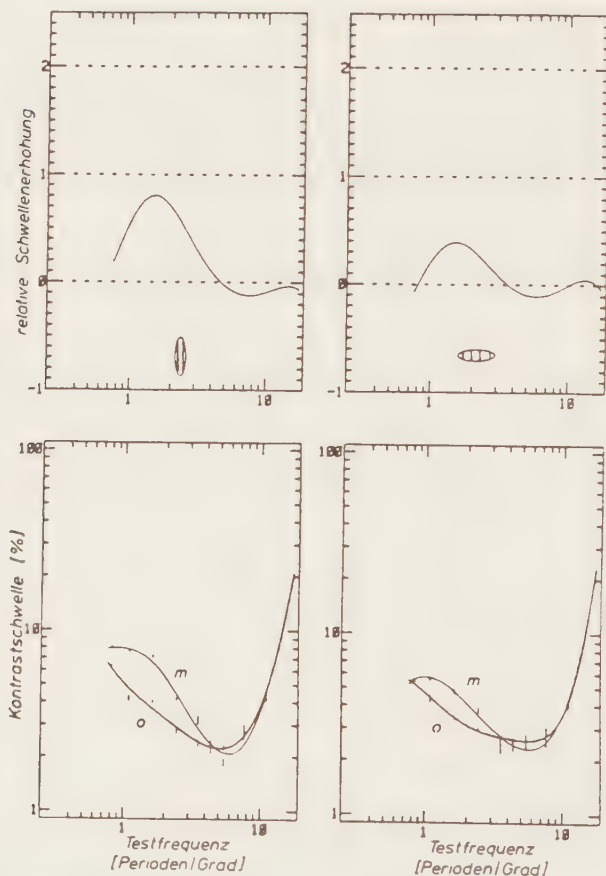


Bild 6.4.1: Kontrastschwellen und Ortsfrequenzbandbreiten für elliptische Gaborfunktionen. a), b): Differenz der Kurven für mit (m) und ohne (o) Adaptation aus c) und d). Vertikale Ellipse: a), c); horizontale Ellipse: b), d). Interpolation der Meßpunkte in c) und d) durch Gaußfunktionen.

Im Versuch von Bild 6.4.1 beträgt das Verhältnis der Halbachsen a/b ($= \delta x : \delta y$) $= 0.5$. Aus Teilbild a) und b) ergibt sich für das Bandbreitenverhältnis von vertikalen und horizontalen Ellipsen $\delta f_y / \delta f_x = 0.49$. Die Halbachsenverhältnisse des Ortsraums übertragen sich also direkt auf den Frequenzbereich. Berechnet man mit Gleichung (24) die zweidimensionale Unschärferelation, so ergibt sich dafür ein Wert der um den Faktor 8 über dem Minimalwert $1/16$ liegt.

Die Versuchsperson KG erreicht bei gleicher experimenteller Anordnung einen Faktor 10 über dem Unschärfewert. Andere Verhältnisse der Halbachse (z.B. 0.33) liegen meistens weiter vom Minimalwert entfernt (Faktor 60). Eine Ursache dafür ist vermutlich die Größe des Testreizes, die bei 0.33 in der Längsachse schon ein Grad Sehwinkel überdeckt. Aus der Entfernung vom Unschärfeminimum läßt sich unter der Voraussetzung, daß Gaborprofile zur Beschreibung herangezogen werden können, auf die Lokalisierung der beteiligten rezeptiven Felder rückschließen. Genauere quantitative Aussagen zu dieser Hypothese benötigen zusätzliche Experimente mit weiter modifizierten elliptischen Reizen.

Auf Grund der Resultate ist eine Übertragung dieser Gaborfunktionen in den x-y-t Raum der Bewegungswahrnehmung durchaus denkbar. Sie entsprechen örtlich / zeitlich orientierten Filtern. In Analogie läßt sich die Unschärferelation aus Frequenzbandbreite und Ortsbreite zu einem Produkt von Ortsfrequenz f und Zeitfrequenz t umformen:

$$\delta f \cdot \frac{\delta x}{\delta t} \cdot \delta t \geq \bar{K} \quad , \quad K \text{ konstant}$$

$$\delta f \cdot \delta t \geq \frac{K}{v} \quad (24a)$$

Daraus folgt, bei fester Zeitauflösung δt , sofort die Abhängigkeit von hoher Geschwindigkeit und kleiner Ortsauflösung oder kleine Geschwindigkeit und großer Ortsauflösung, die BURR (1979-1982) in seinen Experimenten bestätigt.

6.5 Interpretation der Ergebnisse

Alle Experimente isolieren eine visuelle Verarbeitungsstufe, die erst mit der Einführung einer induzierenden Objektbewegung aktiviert wird. Eine unmittelbare Folge davon ist, daß bei der Messung von Reaktionszeiten auf das Testobjekt, die Orientierungsabhängigkeit der Objektbewegung verschwindet, die bei Experimenten ohne Induktionsvorlauf noch vorhanden ist (z.B.: Bild 5.4.3). Die Unabhängigkeit der Antworten einer Versuchsperson von den Bewegungsrichtungen wie sie BALL (1980) für Reaktionszeiten, Kontraste und den Bewegungsnacheffekten feststellt, existiert nur bei Versuchen mit induzierender Bewegungsinformation (z.B.: Bild 5.4.15). Flächenhafte, lokalisierte Objekte zeigen, abhängig von der Exzentrizität, sowohl in den Reaktionszeiten als auch den Verschiebungsschwellen ausgeprägte Richtungscharakteristiken (z.B.: Bild 5.3.4 und Bild 5.4.3). Gleich- und gegensinnige Bewegungen zwischen Induktions- und Testobjekt sind nur bei der Verschiebungsschwellenmessung signifikant. In Bild 5.3.28 werden gleichsinnige Richtungen deutlich besser wahrgenommen. Die Reaktionszeitmessung läßt ein solches Verhalten nicht erkennen (Bild 5.4.4). Obwohl die Bewegungen sogar auf der Verbindungslinie der Objekte ablaufen, existieren keine Richtungsabhängigkeiten. Das

Balkenexperiment mit Reaktionszeitmessungen zeigt, im Gegensatz zur Verschiebungsmessung mit zwei Objekten, bei gegensinnigen Bewegungen eine verbesserte Wahrnehmung (Bild 5.4.26/27). Die Reaktionszeit spiegelt hier wahrscheinlich den "Überraschungseffekt" einer gegenläufigen Bewegung wieder. Dies tritt um so stärker in Erscheinung, je größer die Erwartungshaltung der Versuchsperson für eine gleichsinnige Bewegung ist. Die, im Vergleich mit den Messungen mit zwei Objekten, große Induktionsstrecke und -zeit prägt die Erwartungshaltung.

Die Bewegungsinformation breitet sich gleichmäßig über große Gesichtsfeldbereiche aus. Im Vergleich zu Adaptationsexperimenten mit nur lokaler Wirkung, beträgt in diesen Experimenten die Reichweite des Effekts etwa das 15-fache der Induktionsbewegungsstrecke (Kap. 5.3.7). Der zwischen lokalen Bewegungszentren bestehende Informationstransfer wird durch globale Gitterbewegungen nicht beeinflusst (siehe Bild 5.4.6).

Die Ausbreitung der Bewegungsinformation eines lokalen Reizes ist abhängig von der den Mechanismen zur Verfügung gestellten Bewegungsenergie, die von der Reizgeschwindigkeit und der Zahl der betroffenen Detektoren (Induktionsbewegungsstrecke) abhängt. Je nach Rezeptorrasterdichte zeigt sich also eine Abhängigkeit von der induzierenden Bewegungsrichtung. Eine weitere Steigerung der Empfindlichkeit läßt sich bei gleichen Induktions- und Testgeschwindigkeiten erreichen (siehe z.B. Bild 5.4.8).

In Bild 6.5.1 ist Empfindlichkeit E auf einen Bewegungsreiz über dem retinalen Ort x und der Zeit t aufgetragen. Es wird dabei angenommen, daß nach einem Bewegungsreiz die Empfindlichkeit für bewegte Objekte an dieser retinalen Stelle maximal ist. Die Oberfläche in Bild 6.5.1 modelliert die Ausbreitung der Wahrnehmungsempfindlichkeit des (lokalen) Bewegungsreizes (Gaußfunktion). Schon nach kurzer Zeit wird die Gaußfunktion verbreitert und ihr Maximum reduziert. Gleichzeitig ist ein Anwachsen der Empfindlichkeit über das gesamte dargestellte retinale Gebiet zu beobachten. Die Eingangsenergie bestimmt dabei die Größe und Geschwindigkeit der Informationsausbreitung. Für große Zeiten t klingt die Empfindlichkeitserhöhung wieder langsam ab. Aus den Experimenten lassen sich keine Aussagen über die absoluten Empfindlichkeitsniveaus von dem lokalen (Gaußfunktion) und dem globalen (Plateau) Maximum treffen, da in keinem Experiment der Testreiz am Induktionsort gegeben wird. So ist es ebenfalls denkbar, daß das globale Empfindlichkeitsniveau auf den Maximalwert der lokalen Gaußverteilung bei $t = t_0$ anwächst. Für eine solche Verteilungsfunktion kann dann allerdings die Energiebetrachtungsweise nicht mehr angewendet werden.

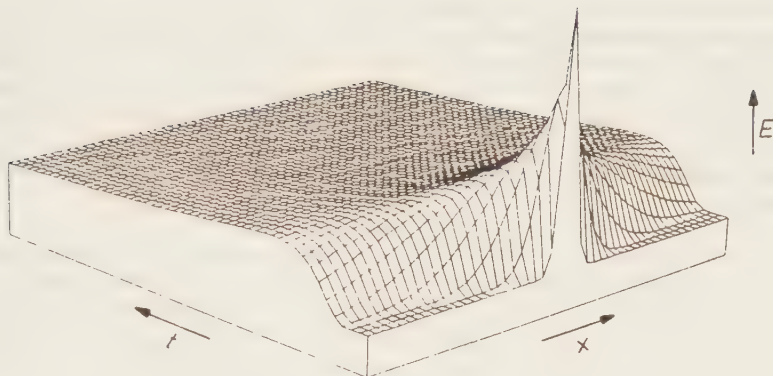


Bild 6.5.1: Modellierung der Ausbreitung einer lokalen Bewegungsinformation. Aufgetragen ist die Empfindlichkeit auf einen Bewegungsreiz E über der retinalen Koordinate x und der Zeit t .

Die Kurven lassen sich mathematisch durch eine Gaußfunktion mit zeitabhängiger Amplitude A und Halbwertsbreite σ beschreiben. Berücksichtigt man noch die retinale Inhomogenität ϵ , so hängt die Halbwertsbreite auch noch von der Detektordichte ab. Die Figur aus Bild 6.5.1 verliert dann natürlich ihre Symmetrieeigenschaft:

$$E = A(t) \cdot e^{-x^2 / \sigma^2(t, t)}. \quad (26)$$

Die Ausdehnung der ersten, noch lokalen Empfindlichkeitserhöhung verbreitert sich durch einen Diffusionsprozeß. Eine zeitliche Ausbreitung wird zu einer örtlichen Ausbreitung des Signals. Dies drückt sich in der Diffusionsgleichung aus: örtliche Differenzen (Laplace) sind formal äquivalent zu zeitlichen Änderungen,

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} E(x, \epsilon, t) = \frac{\partial}{\partial t} E(x, \epsilon, t). \quad (27)$$

Eine mögliche Lösung von (27) bilden Gaußfunktionen. ZUCKER (1986) entwickelt daraus die Strukturen von rezeptiven Feldern.

Die Figur in Bild 6.5.1 leitet sich aus einer im Exponenten modifizierten Lösung der Diffusionsgleichung ab. Für A und σ aus (26) steht dann:

$$A(t) = \frac{1}{\sqrt{(4 \cdot \pi \cdot t)}} \quad , \quad \sigma^2(t) = 4 \cdot t^3. \quad (28)$$

Die dritte Potenz von t (in (28)) ist für den raschen Anstieg der globalen Bewegungsempfindlichkeit nach dem lokalen Bewegungsreiz

verantwortlich. Die Wurzelfunktion beeinflußt das Abklingen des gesamten Empfindlichkeitsniveaus. Betrachtet man die Größe der Empfindlichkeit als eine Art Energie, die sich über große retinale Gebiete ausbreitet, so muß für jeden Zeitpunkt t in Bild 6.5.1 das Integral über den Ort x den gleichen Wert besitzen. Die Eingangsenergie ist abhängig von der pro Zeiteinheit überdeckten Rezeptorzahl. In den Experimenten sind dafür insbesondere die Parameter induzierende Objektgeschwindigkeit und induzierende Bewegungsstrecke verantwortlich.

Die Effekte sind vergleichbar mit Ergebnissen aus kürzlich veröffentlichten Experimenten zu sogenannten Expreß-Sakkaden von FISCHER (1986) und ROGAL (1986). Diese Sakkaden sind zielgerichtet und besitzen kleinere Reaktionszeiten (ca. 70–100ms) als man gewöhnlichen Sakkaden zuschreibt. FISCHER (1987) demonstriert, daß es möglich ist, große Gesichtsfeldbereiche für diese Sakkadenart von einem Fixationspunkt aus zu sensibilisieren. Das Erzeugen von Expreß-Sakkaden ist ebenfalls unabhängig vom Ort des Zielpunktes. Eine Unabhängigkeit vom Zeitpunkt des Erscheinens eines Zielpunktes ist nur dann gegeben, wenn ein augenblicklich aktiver Fixationszustand schon beendet ist. Dies bedeutet, daß die Aufmerksamkeit, trotz gleicher Augenstellung, vom Fixationspunkt abgehoben wird und sich über einen großen Gesichtsfeldbereich verteilen kann. Die Reizkonfigurationen in den Induktionsmessungen erzeugen die gleiche Erweiterung einer Aufmerksamkeit und die damit verbundene Erhöhung der Empfindlichkeit.

Ein Vergleich mit dem in der Literatur diskutierten Aufmerksamkeitsprozeß (ERIKSEN, 1972; HOFFMAN, 1975; TSAL, 1983) zeigt, daß die Resultate nicht mit der gewöhnlich favorisierten "shifting focus"-Theorie (SHULMAN, 1979; ERIKSEN, 1985) oder der "Gradienten"-Theorie mit beschränkter Verarbeitungskapazität (SHAW, 1978) in Einklang zu bringen sind (siehe auch Kap. 6.1). Alle Autoren benutzen Reizkonfigurationen ohne Bewegungen. Mit bewegten Objekten werden jedoch andere Mechanismen angesprochen als bei den Aufmerksamkeitsexperimenten. Beide Modellvorstellungen sind jedoch inzwischen nicht mehr unumstritten. LABERGE (1986) weist in seinen Experimenten zu einem Aufmerksamkeitsbereich darauf hin, daß beide Theorien seine Resultate nicht erklären können.

Mit dem Prozeß der globalen Schwellenabsenkung für einen bestimmten Reiz schließt sich der visuelle Verarbeitungskreis: Zunächst wird eine Szene zur Lokalisierung der interessierenden Einzelheiten mit Augenbewegungen abgetastet. Danach findet die detaillierte Analyse der ausgewählten lokalen Struktur statt (siehe auch GERRISSEN, 1984). Die lokalen Empfindungsschwellen werden dann im Falle der Bewegungswahrnehmung auf die globale Ebene (z.B. nach der Figur von Bild 6.5.1) übertragen und ermöglichen dadurch eine einfachere und schnellere Aufnahme gleichgearteter Vorgänge.

Verarbeitungsmechanismen, die die obigen Eigenschaften besitzen, müssen auf verschiedenen, hierarchisch angeordneten Ebenen lokalisiert sein (z.B. nach BURTON, 1986). Als Einstieg in die Verarbeitungshierarchie wird auf lokal begrenzten Gebieten eine Korrelation der Signale durchgeführt. Dies geschieht mit Detektorenanordnungen und -verschaltungen wie sie REICHARDT (1961) vorgeschlagen hat. Die Ausgangssignale dieser Stufe treten in die nächst höhere Ebene ein. Dort findet dann ein ausgeprägter Diffusionsvorgang statt. Eine lokale Information verteilt sich so über eine große Anzahl von Neuronen. Eine Beschleunigung des Diffusionsprozesses läßt sich durch die Einführung einer weiteren, höheren Stufe erreichen, die Zellen enthält, die viele Neurone der vorherigen Verarbeitungsstufe beeinflussen können. Bild 6.5.2 verdeutlicht dies.

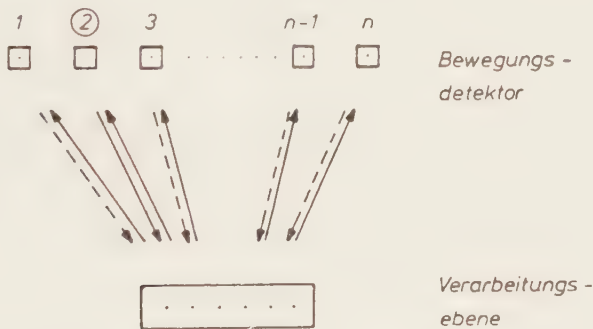


Bild 6.5.2: Verarbeitungshierarchie mit lokaler Bewegungserkennung und globaler Bewegungssensibilisierung. Detektor 2 meldet der Verarbeitungsebene einen vorhandenen Bewegungsreiz. Daraufhin sensibilisiert die Verarbeitungsebene alle in ihren Bereich liegenden Detektoren (durchgezogene Pfeile). Gestrichelte Pfeile symbolisieren eine inaktivierte Verbindung.

Mit dem Parameter σ nach (28) erfüllt die Lösung (26) nicht mehr die Diffusionsgleichung (27). Die dritte Potenz der Zeit t steht dem entgegen. Dies bedeutet, daß die globale Bewegungssensibilisierung nach einem lokalen Bewegungsreiz nicht vollständig mit einem Diffusionsprozeß beschrieben werden kann. Der Informationstransfer zwischen hierarchisch angeordneten neuronalen Schichten ist kein Diffusionsvorgang mehr. Nur innerhalb einer Schicht läßt sich die Ausbreitung der Empfindlichkeit mit einer Diffusion vergleichen. Hier findet die von ZUCKER (1986) mit einer Diffusion beschriebene Verbreiterung der rezeptiven Feldstrukturen statt. Es existiert also kein dreidimensionaler Diffusionsprozeß.

Neuronale Strukturen, die wechselwirkende, globale und lokale Bewegungsmechanismen aufweisen, konnten von HOFFMAN (1982) und GRASSE (1984)

Diskussion

im visuellen System der Katze aufgedeckt werden. Es liegt der Schluß nahe, diesen Mechanismen die in den Experimenten isolierten Eigenschaften zuzuschreiben.

7. Anhang A: Literaturverzeichnis

- ABRAMOWITZ M., STEGUN I.A.
HANDBOOK OF MATHEMATICAL FUNCTIONS
DOVER PUBLICATIONS, INC., NEW YORK, 1972
- ADELSON E.H., MOVSHON J.A.
PHENOMENAL COHERENCE OF MOVING VISUAL PATTERNS
NATURE, 300, 1982
- ADELSON E.H.
SOME NEW ILLUSIONS AND SOME OLD ONES, ANALYSED IN TERMS
OF THEIR FOURIER COMPONENTS
INVEST. OPHTHALMOL. VIS. SCI. SUPPL., 22, 144, 1982
- ADELSON E.H., BERGEN J.R.
SPATIAL-TEMPORAL ENERGY MODELS FOR THE PERCEPTION OF MOTION
JOSA, A, 2(2), 1985
- ALBRECHT D.G., HAMILTON D.B.
STRIATE CORTEX OF MONKEY AND CAT: CONTRAST RESPONSE FUNCTION
JOURNAL OF NEUROPHYSIOL., 48, 217-237, 1982
- ALBRIGHT T.D., DESIMONE R., GROSS C.G.
COLUMNAR ORGANIZATION OF DIRECTIONALLY SELECTIVE CELLS
IN VISUAL AREA MT OF THE MACAQUE
JOURNAL OF NEUROPHYSIOLOGIE, 51(1), 1984
- ALLIK J., DZHAFAROV E.N.
REACTION TIME TO MOTION ONSET: LOCAL DISPERSION MODEL
ANALYSIS
VISION RESEARCH, 24(2), 99-101, 1984
- ALLMAN J., MIEZIN F., MCGUINNESS E.L.
DIRECTION- AND VELOCITY-SPECIFIC RESPONSES FORM BEYOND
THE CLASSICAL RECEPTIVE FIELD IN THE MIDDLE TEMPORAL
VISUAL AREA (MT)
PERCEPTION, 14, 105-126, 1985
- ANDERSON S.J., BURR D.C.
SPATIAL AND TEMPORAL SELECTIVITY OF THE HUMAN MOTION
DETECTION SYSTEM
VISION RESEARCH, 25(8), 1147-1154, 1985
- ANSTIS S.
VISUAL CODING OF POSITION AND MOTION
BIOLOGICAL PROCESSING OF IMAGES, BRADDICK, SPRINGER(VERLAG),
1983
- ANSTIS S., DUNCAN K.
SEPARATE MOTION AFTEREFFECTS FROM EACH EYE AND FROM
BOTH EYES
VISION RESEARCH, 23(2), 161-169, 1983
- ANSTIS S., GIACHI D.
ADAPTATION TO APPARENT MOTION
VISION RESEARCH, 25(8), 1051-1062, 1985
- ANSTIS S.
RECOVERING MOTION INFORMATION FROM LUMINANCE
VISION RESEARCH, 26(1), 147-160, 1986
- ANSTIS S., RAMACHANDRAN V.S.
ENTRAINED PATH DEFLECTION IN APPARENT MOTION
VISION RESEARCH, 26(10), 1731-1739, 1986
- ANSTIS S.M., ROGERS B.J.
ILLUSORY REVERSAL OF VISUAL DEPTH AND MOVEMENT DURING
CHANGES OF CONTRAST
VISION RESEARCH, 15, 957-961, 1975
- ANSTIS S.M.
THE PERCEPTION OF APPARENT MOTION
PHIL. TRANS. R. SOC. LOND., 290, 153-168, 1980
- AREND L.E., TIMBERLAKE G.T.
WHAT IS PSYCHOPHYSICALLY PERFECT IMAGE STABILIZATION ?
DO PERFECTLY STABILIZED IMAGES ALWAYS DISAPPEAR ?
JOSA, A, 3(2), 235-241, 1986
- ARNSTEIN V.
AUFBAU EINER RECHNERGESTEUERTEN PROJEKTIONSEINRICHTUNG
FÜR FARBIGE UMFELDER
LAUFENDE DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN,
1987
- BAHILL A.T., HARVEY D.R.
OPEN-LOOP EXPERIMENTS FOR MODELING THE HUMAN EYE MOVEMENT
SYSTEM
IEEE TRANS. ON SMC, SMC-16(2), 1986
- BAKER C.L., BRADDICK O.J.
TEMPORAL PROPERTIES OF THE SHORT-RANGE PROCESS IN APPARENT
MOTION
PERCEPTION, 14(2), 181-192, 1985
- BALL K., SEKULER R.
MODELS OF STIMULUS UNCERTAINTY IN MOTION PERCEPTION

- PSYCHOLOGICAL REVIEW, 87(5), 435-469, 1980
- BARBER P.J., POLKARDS
REACTION TIME UNDER STIMULUS UNCERTAINTY WITH RESPONSE
CERTAINTY
JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY, 93(1), 138-142,
1972
- BARBUR J.L., RUDDOCK K.H.
SPATIAL CHARACTERISTICS OF MOVEMENT DETECTION MECHANISMS
IN HUMAN VISION. I. ACHROMATIC VISION, II. CHROMATIC
STIMULI
BIOLOGICAL CYBERNETICS, 37, 1980
- BARLOW H.B.
CRITICAL LIMITING FACTORS IN THE DESIGN OF THE EYE AND
VISUAL CORTEX
PROC. R. SOC. LOND., 212, 1-34, 1981
- BASTIAANS M.J.
A SAMPLING THEOREM FOR THE COMPLEX SPECTROGRAM AND GABORS'
EXPANSION OF A SIGNAL IN GAUSSIAN ELEMENTARY SIGNALS
OPTICAL ENGINEERING, 20(4), 594-598, 1981
- BISCHOF W.F., GRÖNER M.
BEYOND THE DISPLACEMENT LIMIT: AN ANALYSIS OF SHORT-RANGE
PROCESSES IN APPARENT MOTION
VISION RESEARCH, 25(6), 839-847, 1985
- BLAKEMORE C., CAMPBELL F.W.
ON THE EXISTENCE OF NEURONS IN THE HUMAN VISUAL SYSTEM
SELECTIVELY SENSITIVE TO THE ORIENTATION AND SIZE OF
RETINAL IMAGES
JOURNAL OF PHYSIOLOGY, 203, 237-260, 1969
- BONNET C.
VISUAL MOTION DETECTION MODELS: FEATURES AND FREQUENCY
PERCEPTION, 6, 491-500, 1977
- BRADDICK O.
A SHORT-RANGE PROCESS IN APPARENT MOTION
VISION RESEARCH, 14, 519-527, 1974
- BREITMEYER B.G.
EYE MOVEMENTS ENHANCE VISIBLE PERSISTENCE
SUBMITTED TO VISION RESEARCH, 1982
- BRUDER G.E., KIETZMAN M.L.
VISUAL TEMPORAL INTEGRATION FOR THRESHOLD, SIGNAL DETECTABILITY,
AND REACTION TIMES MEASURES
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 13(2), 293-300, 1973
- BUCHSBAUM G.
THE RETINA AS A TWO-DIMENSIONAL DETECTOR ARRAY IN THE CONTEXT
OF COLOR VISION THEORIES AND SIGNAL DETECTION THEORY
PROCEEDINGS OF THE IEEE, 69(7), 772-786, 1981
- BUCKINGHAM T., FREIER B.
THE INFLUENCE OF ADAPTING VELOCITY AND LUMINANCE ON
THE MOVEMENT AFTEREFFECT
OPHTHAL. PHYSIOL. OPT., 5(2), 117-124, 1985
- BURKHARDT D.A., GOTTESMAN J., KEENAN R.M.
SENSORY LATENCY AND REACTION TIME: DEPENDENCE ON CONTRAST
POLARITY AND EARLY LINEARITY IN HUMAN VISION
JOSA A, 4(3), 530-539, 1987
- BURR D.
MOTION SMEAR
NATURE, 284, 1980
- BURR D.C.
ON THE VISIBILITY AND APPEARANCE OF OBJECT IN MOTION
PH. D. - THESIS UNIVERSITY OF CAMBRIDGE UK, 1979
- BURR D.C.
TEMPORAL SUMMATION OF MOVING IMAGES BY THE HUMAN VISUAL SYSTEM
PROC. R. SOC. LOND., 211, 321-339, 1981
- BURR D.C., ROSS J.
CONTRAST SENSITIVITY AT HIGH VELOCITIES
VISION RESEARCH, 22, 479-484, 1982
- BURR D.C., MORRONE M.C., ROSS J.
LOCAL AND GLOBAL VISUAL PROCESSING
VISION RESEARCH, 26(5), 749-757, 1986
- BURR D.C., ROSS J., MORRONE M.C.
SEEING OBJECTS IN MOTION
PROC. R. SOC. LOND., 277, 249-265, 1986
- BURT P.J.
FAST FILTER TRANSFORMS FOR IMAGE PROCESSING
COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 16, 20-51, 1981
- BURT P.J., ADELSON E.H.
THE LAPLACIAN PYRAMID AS A COMPACT IMAGE CODE
IEEE TRANS. ON COMMUNICATIONS, COM-31(4), 532-540, 1983
- BURTON G.J., HAIG N.D., MOORHEAD I.R.
A SELF-SIMILAR STACK MODEL FOR HUMAN AND MACHINE VISION
BIOLOGICAL CYBERNETICS, 53, 397-403, 1986
- CAMPBELL F.W., ROBSON J.G.
APPLICATION OF FOURIER ANALYSIS TO THE VISIBILITY OF
GRATINGS
JOURNAL OF PHYSIOLOGY, 197, 551-566, 1968

- CAVANAGH P., BOEGLIN J., FAVREAU O.E.
PERCEPTION OF MOTION IN EQUILUMINOUS CINEMATOGRAMS
PERCEPTION, 14, 151-162, 1985
- CAVANAGH P., ANSTIS S.M.
BRIGHTNESS SHIFT IN DRIFTING RAMP GRATINGS ISOLATES
A TRANSIENT MECHANISM
VISION RESEARCH, 26(6), 899-908, 1986
- CHANG J.J., JULESZ B.
COOPERATIVE PHENOMENA IN APPARENT MOVEMENT PERCEPTION
OF RANDOM-DOT CINEMATOGRAMS
VISION RESEARCH, 24(12), 1781-1788, 1984
- CHEN I.
TOPOLOGICAL STRUCTURE IN THE PERCEPTION OF APPARENT
MOTION
PERCEPTION, 14, 197-208, 1985
- COHEN R.L., BONNET C.
MOVEMENT DETECTION THRESHOLDS AND STIMULUS DURATION
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 12(3), 269-272, 1972
- COLEMAN P., HADASSAH P.
LEARNING AND TRANSFER
PSYCHOLOGICAL REVIEW, 76, 537-558, 1969
- COLLEWIJN H.
THE OPTOKINETIC SYSTEM IN MODELS OF OCULOMOTOR BEHAVIOR
AND CONTROL
CRC PRESS, BOCA RATON, FL, ED. ZUBER B.L., 1982
- COLTHEART M.
ICONIC MEMORY AND VISIBLE PERSISTENCE
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 27(3), 182-228, 1980
- CORNISWET T.N.
THE STAIRCASE - METHOD IN PSYCHOPHYSICS
AMERICAN JOURNAL OF PSYCHOLOGY, 75, 485-491, 1962
- COTTRELL M., FORT J.C.
A STOCHASTIC MODEL OF RETINOTOPY: A SELF ORGANIZING PROCESS
BIOL. CYBERN., 53, 405-411, 1986
- CREMIEUX J., ORBAN G.A., DUYSSENS J.
RESPONSES OF CAT VISUAL CORTICAL CELLS TO CONTINUOUSLY
AND STROBOSCOPICALLY ILLUMINATED MOVING LIGHT SLITS
COMPARED
VISION RESEARCH, 24(5), 449-457, 1984
- DAUGMAN J.C.
TWO-DIMENSIONAL SPECTRAL ANALYSIS OF CORTICAL RECEPTIVE
FIELD PROFILES
VISION RESEARCH, 20, 847-856, 1980
- DAUGMAN J.C.
UNCERTAINTY RELATION FOR RESOLUTION IN SPACE, SPATIAL
FREQUENCY AND ORIENTATION OPTIMIZED BY TWO-DIMENSIONAL
VISUAL CORTICAL FILTERS
JOSA A, 2(7), 1985
- DAWSON M.R.W., HARSHMAN R.A.
THE MULTIDIMENSIONAL ANALYSIS OF ASYMMETRIES IN ALPHABETIC
CONFUSION MATRICES: EVIDENCE FOR GLOBAL-TO-LOCAL AND
LOCAL-TO-GLOBAL PROCESSING
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 40(6), 370-383, 1986
- DE WEERT C.M.M., WADE N.J.
RESEARCH NOTE: CANCELLING OF PATTERN MOTION: DICHOPIC
AND MONOPTIC OBSERVATIONS
VISION RESEARCH, 24(8), 883-887, 1984
- DENK W.
PSYCHOPHYSIKALISCHE EXPERIMENTE ZUM EINFLUSS VON VORINFOR-
MATION AUF DIE WAHRNEHMUNG VON BEWEGTEN OPTISCHEN STRUKTUREN
LAUFENDE DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN,
1987
- DERLICH H.
UNTERSUCHUNGEN ZUR DEMONSTRATION DES MAC COLLOUGH EFFEKTS
PRAKTIKUM AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1983
- DERLICH H.
SCHWELLENBESTIMMUNGEN AN ELLIPTISCHEN GABORFUNKTIONEN
LAUFENDE DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, 1987
- DEUBEL H., ELSNER T.
THRESHOLD PERCEPTION AND SACCADIC EYE MOVEMENTS
BIOL. CYBERN., 54, 351-358, 1986
- DIMMICK R.C., KARL J.C.
THE EFFECT OF EXPOSURE TIME UPON THE REIZ LIMEN OF VISIBLE
MOTION
JOURNAL OF EXPERIMENTAL PSYCHOLOGY, 13, 365-369, 1930
- DITCHEBURN R.W.
EYE MOVEMENTS AND VISUAL PERCEPTION
CLARENDON, OXFORD, 1979
- DURRETT H.J.
COLOR DISPLAY SYSTEMS: THE STATE OF THE ART
BEHAVIOR RESEARCH METHODS & INSTRUMENTATION, 11, 127-130,
1979
- DUYSSENS J., ORBAN G.A., CREMIEUX J., MAES H.
VISUAL CORTICAL CORRELATES OF VISIBLE PERSISTENCE

- VISION RESEARCH, 25(2), 171-178, 1985
- EJIMA Y., OHTANI Y.
SIMPLE REACTION TIME TO SINOSOIDAL GRATING AND PERCEPTUAL
INTEGRATION TIME: CONTRIBUTIONS OF PERCEPTUAL AND RESPONSE
PROCESSES
VISION RESEARCH, 27(2), 269-276, 1987
- EMERSON P.L.
OBSERVATIONS ON A MAXIMUM LIKELIHOOD METHOD OF SEQUENTIAL
THRESHOLD ESTIMATION AND A SIMPLIFIED APPROXIMATION
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 36(2), 199-203, 1984
- ERIKSEN C.W., HOFFMAN J.E.
SOME CHARACTERISTICS OF SELECTIVE ATTENTION IN VISUAL
PERCEPTION DETERMINED BY VOCAL REACTION TIME
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 11(2), 169-171, 1972
- ERIKSEN C.W., HOFFMAN J.E.
TEMPORAL AND SPATIAL CHARACTERISTICS OF SELECTIVE ENCODING
FROM VISUAL DISPLAYS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 12(2B), 201-204, 1972
- ERIKSEN C.W., YEH Y.Y.
ALLOCATION OF ATTENTION IN THE VISUAL FIELD
JOURNAL OF EXP. PSYCHOLOGY: HUMAN PERCEPTION AND PERFORMANCE,
11(5), 583-597, 1985
- ESSENS P.J.
HIERARCHICAL ORGANIZATION OF TEMPORAL PATTERNS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 40(2), 69-73, 1986
- FAVREAU O.E.
MOTION AFTEREFFECTS: EVIDENCE FOR PARALLEL PROCESSING
IN MOTION PERCEPTION
VISION RESEARCH, 16, 181-186, 1976
- FELDHÜTTER O.
MESSUNG DER ZEITLICHEN VARIATION VON PUPILLENFLÄCHE
UND -POSITION BEI VERSCHIEDENEN SEHAUFGABEN
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1985
- FENNEMA C.L., THOMPSON W.B.
VELOCITY DETERMINATION IN SZENES CONTAINING SEVERAL
MOVING OBJECTS
COMPUTER GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 9, 301-315,
1979
- FINLAY D.
MOTION PERCEPTION IN THE PERIPHERAL VISUAL FIELD
PERCEPTION, 11, 457-462, 1982
- FISCHER B.
LOKALE ORTSFREQUENZANALYSE
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1982
- FISCHER B., ROGAL L.
EYE-HAND-COORDINATION IN MAN: A REACTION TIME STUDY
BIOLOGICAL CYBERNETICS, 55(4), 253-, 1986
- FISHER D.F., MONTY R.A., SENDERS J.W.
EYE MOVEMENTS: COGNITION AND VISUAL PERCEPTION
LAWRENCE ERLBAUM ASSOCIATES, PUBLISHERS, HILLSDALE, NEW
JERSEY, 1981
- FUKUSHIMA K.
A NEURAL NETWORK MODEL FOR SELECTIVE ATTENTION IN VISUAL
PATTERN RECOGNITION
BIOL. CYBERN., 55, 5-15, 1986
- GABOR D.
THEORY OF COMMUNICATION
JOURNAL OF THE INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS,
93(PART. III), 429-441, 1946
- GAFNI H., ZEEVI Y.Y.
A MODEL FOR PROCESSING OF MOVEMENT IN THE VISUAL SYSTEM
BIOL. CYBERN., 32, 165-173, 1979
- GEIGER H.
KALZIUMSTRÖME UND LERNPROZESSE IN DER ENTWICKLUNG DES
VISUELLEN SYSTEMS DER KATZE
DISSERTATION AN DER SEKTION PHYSIK, LMU MÜNCHEN, 1983
- GEORGESON M.
ANTAGONISM BETWEEN CHANNELS FOR PATTERN AND MOVEMENT
IN HUMAN VISION
NATURE, 259, 1976
- GEORGESON M.A.
EYE MOVEMENTS, AFTERIMAGES AND MONOCULAR RIVALRY
VISION RESEARCH, 24(10), 1311-1319, 1984
- GERBER K., PERIZONIUS E.
ORTSFREQUENZEN IN FARBE, ZEITLICHE DARBEITUNG VON KONTRAST
PRAKTIKUM AM INST. F. MED. OPTIK, 1979
- GERBER K.
ENTWICKLUNG UND BAU EINES COMPUTERGESTEUERTEN BILDGENERATORS
FÜR PSYCHOPHYSIKALISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR FARBMUSTERERKENNUNG
AM VISUELLEN SYSTEM
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, 1982
- GERBER K., SCHILL W.
DIGITALER FARBMUSTERGENERATOR
DGAO-TAGUNG, ISNY, WEST GERMANY, 1984

- GERBER K.
STÜTZT SICH DIE VISUELLE BEWEGUNGSWAHRNEHMUNG AUF LOKALE GESCHWINDIGKEITSELEMENTE ODER AUF DIE INTERPOLATION VON LAGE-INFORMATIONEN DES OBJEKTS ZU VERSCHIEDENEN ZEITEN ?
VORTRAG, DGAO-TAGUNG, ISNY, WEST GERMANY, 1984
- GERBER K.
HANDLE - DOCUMENTATION
INST. F. MED. OPTIK, 1985
- GERBER K., DERLICH H., SAJUK T.O.
FMG - SYSTEM LIBRARY DOCUMENTATION
INST. F. MED. OPTIK, 1985
- GERBER K., DERLICH H., SAJUK T.O.
MASTER - SLAVE - UTILITY DOCUMENTATION
INST. F. MED. OPTIK, 1986
- GERBER K., DERLICH H.
PSYCHOPHYSICAL THRESHOLD ESTIMATION OF SPATIAL - FREQUENCY AND ORIENTATION BANDWIDTH WITH ELLIPTIC GABORSIGNALS
VORTRAG, DGAO TAGUNG, DEN HAAG, 1986
- GERBER K., RÖHLER R.
MOTION DETECTION IS INFLUENCED BY THE PRESENCE OF AN INDUCING MOTION
VORTRAG, 9. EUROPEAN VISION CONFERENCE, BAD NAUHEIM, 1986
- GERRISSEN J.F.
THEORY AND MODEL OF THE HUMAN GLOBAL ANALYSIS OF VISUAL STRUCTURE
IEEE TRANS. ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, SMC-12(6), 1982
- GERRISSEN J.F.
THEORY AND MODEL OF THE HUMAN GLOBAL ANALYSIS OF VISUAL STRUCTURE: PART II: THE SPACE-TIME AND VISUAL VALUE SEGMENT.
IEEE TRANS. ON SYSTEMS, MAN, AND CYBERNETICS, SMC-14(6), 1984
- GIBSON J.J.
WHAT GIVES RISE TO THE PERCEPTION ON MOTION ?
PSYCHOL. REV., 75, 335-346, 1968
- GOREA A.
RESEARCH NOTE: TEMPORAL INTEGRATION CHARACTERISTICS IN SPATIAL FREQUENCY IDENTIFICATION
VISION RESEARCH, 26(3), 511-515, 1986
- GRASSE K., CYNADER M.S., DOUGLAS R.M.
ALTERNATIONS IN RESPONSE PROPERTIES IN THE LATERAL AND DORSAL NUCLEI OF THE CAT ACCESSORY OPTIC SYSTEM FOLLOWING VISUAL CORTICAL LESIONS
BRAIN RESEARCH, 1984, 1984
- GREEN D.M., SWETS J.A.
SIGNAL DETECTION THEORY AND PSYCHOPHYSICS
ROBERT E. KRIEGER PUBLISHING COMPANY, HUNTINGTON NEW YORK, 1974
- GREEN M.
CONTRAST DETECTION AND DIRECTION DISCRIMINATION OF DRIFTING GRATINGS
VISION RESEARCH, 23(3), 281-289, 1983
- GREGORY R.L.
MOVEMENT NULLING: FOR HETEROCHROMATIC PHOTOMETRY AND ISOLATING CHANNELS FOR REAL AND APPARENT MOTION
PERCEPTION, 14, 193-196, 1985
- GREGORY R.L.
EYE AND BRAIN
MC GRAW-HILL, NEW YORK, 1966
- GRIND VAN DE W.A., KOENDERINK J.J.
THE DISTRIBUTION OF HUMAN MOTION DETECTOR PROPERTIES IN THE MONOCULAR VISUAL FIELD
VISION RESEARCH, 26(5), 797-810, 1986
- GRUNAU VON M.W.
A MOTION AFTEREFFECT FOR LONG-RANGE STROBOSCOPIC APPARENT MOTION
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 40(1), 31-38, 1986
- GRÜSSER O.-J., GRÜSSER - CORNEHLS U.
NEURONAL MECHANISMS OF VISUAL MOVEMENT PERCEPTION AND SOME PSYCHOPHYSICAL AND BEHAVIORAL CORRELATIONS
HANDBOOK OF SENSORY PHYSIOLOGY, EDITED BY JUNG R., 7(3), 333, 1973
- HADANI I., GUR M., MEIRI Z., FENDER D.H.
HYPERACUITY IN THE DETECTION OF ABSOLUTE AND DIFFERENTIAL DISPLACEMENTS OF RANDOM DOT PATTERS
VISION RESEARCH, 20, 947-951, 1980
- HADANI I., ISHAI G., GUR M.
VISUAL STABILITY AND SPACE PERCEPTION IN MONOCULAR VISION: MATHEMATICAL MODEL
JOSA A, 70(1), 1980
- HALL J.L.
HYBRID ADAPTIVE PROCEDURE FOR ESTIMATION OF PSYCHOMETRIC FUNCTIONS

- JOURNAL OF THE ACOUSTIC SOCIETY OF AMERICA, 69(5), 1763-1769, 1981
- HANSEN R.S., WELL A.D.
THE EFFECTS OF STIMULUS SEQUENCE AND PROBABILITY ON PERCEPTUAL PROCESSING
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 35(2), 137-143, 1984
- HESS S.
MESSUNG VON BEWEGUNGSNACHEFFEKTE IM VISUELLEN SYSTEM DES MENSCHEN MIT HILFE EINER KOMPENSATIONSMETHODE
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, 1986
- HILDRETH E.C.
THE DETECTION OF INTENSITY CHANGES BY COMPUTER AND BIOLOGICAL VISIONSYSTEMS
COMPUTER VISION GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, 22, 1-27, 1983
- HILDRETH E.C.
COMPUTATIONS UNDERLYING THE MEASUREMENT OF VISUAL MOTION
ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 23, 309-354, 1984
- HIRSCH J., HYLTON R.
LIMITS OF SPATIAL-FREQUENCY DISCRIMINATION AS EVIDENCE OF NEURAL INTERPOLATION
JOSA A, 72(10), 1367-1374, 1982
- HIRSCH J., HULTON R.
SPATIAL-FREQUENCY DISCRIMINATION AT LOW FREQUENCIES: EVIDENCE FOR POSITION QUANTIZATION BY RECEPTIVE FIELDS
JOSA A, 2(2), 1985
- HOCHSTEIN S., SPITZER H.
ZERO-CROSSING DETECTORS IN PRIMARY VISUAL CORTEX ?
BIOL. CYBERN., 51, 195-199, 1984
- HOFFMAN J.E.
HIERARCHICAL STAGES IN THE PROCESSING OF VISUAL INFORMATION
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 18(5), 348-354, 1975
- HOFFMAN K.P.
CORITCAL VERSUS SUBCORTICAL CONTRIBUTIONS TO THE OPTOKINETIC REFLEX IN THE CAT
FUNCTIONAL BASIS OF OCULAR MOTILITY DISORDER, PERGAMON PRESS, 1982
- HOFFMAN K.P.
CONTROL OF THE OPTOKINETIC REFLEX BY THE NUCLEUS OF THE OPTIC TRAC IN THE CAT
SPATIALLY ORIENTED BEHAVIOR, SPRINGER, ED. HEIN A., 133-154, 1982
- HOLCUB R.A., MORTON - GIBSON M.
RESPONSE OF VISUAL CORTICAL NEURONS OF THE CAT TO MOVING SINUSOIDAL GRATINGS: RESPONSE - CONTRAST FUNCTIONS AND SPATIOTEMPORAL INTERACTIONS
JOURNAL OF NEUROPHYSIOL., 46, 1244-1259, 1981
- HORN B.K.P., SCHUNCK B.G.
DETERMINING OPTICAL FLOW
ARTIFICIAL INTELLIGENCE, 17, 185-203, 1981
- HUBEL D.G., WIESEL T.N.
SEQUENCE REGULARITY AND GEOMETRY OF ORIENTATION COLUMNS IN THE MONKEY STRIATE CORTEX
JOURNAL OF COMP. NEUROL., 158, 267-293, 1974
- HUMMEL R.A., KIMIA B., ZUCKER S.W.
DEBLURRING GAUSSIAN BLUR
COMPUTER VISION GRAPHICS AND IMAGE PROCESSING, PERSONLICHE MITTEILUNG, 1986
- IRWIN D.E., YANTIS S., JONIDES J.
EVIDENCE AGAINST VISUAL INTEGRATION ACROSS SACCADIC EYE MOVEMENTS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 34(1), 49-57, 1983
- JOHNSON C.A., LEIBOWITZ H.W.
VELOCITY-TIME RECIPROCITY IN THE PERCEPTION OF MOTION: FOVEAL AND PERIPHERAL DETERMINATIONS
VISION RESEARCH, 16, 177-180, 1976
- JOHNSON C.A., SCOBEE R.P.
FOVEAL AND PERIPHERAL DISPLACEMENT THRESHOLDS AS A FUNCTION OF STIMULUS LUMINANCE, LINE LENGTH, AND DURATION OF MOVEMENT
VISION RESEARCH, 20, 709-715, 1980
- JOHNSON C.A., SCOBEE R.P.
EFFECTS OF REFERENCE LINES ON DISPLACEMENT THRESHOLDS AT VARIUS DURATION OF MOVEMENT
VISION RESEARCH, 22, 819-821, 1982
- JOHNSTON A., WRIGHT M.J.
VISUAL MOTION AND CORTICAL VELOCITY
NATURE, 304, 436-438, 1983
- JOHNSTON A., WRIGHT M.J.
LOWER THRESHOLDS OF MOTION FOR GRATINGS AS A FUNCTION OF ECCENTRICITY AND CONTRAST
VISION RESEARCH, 25(2), 179-185, 1985
- JULESZ B.
TEXTON GRADIENTS: THE TEXTON THEORY REVISITED
BIOL. CYBERN., 54, 245-251, 1986

- JÜTTNER M., KLEIN P.
PSYCHOPHYSIKALISCHE MESSMETHODEN IM VERGLEICH
PRAKTIKUM AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1985
- JÜTTNER M.
INFORMATIONSTRANSFER BEI AUGENBEWEGUNGEN
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1987
- KAUFMAN L.
THE PERCEPTION OF MOVEMENT
SIGHT AND MIND, OXFORD UNIVERSITY PRESS LONDON, TORONTO,
CHAPURE 10, 1974
- KAWAI H., TAMURA S., KANI K., KARIYA K.
EYE MOVEMENT ANALYSIS SYSTEM USING FUNDUS IMAGES
PATTERN RECOGNITION, 19(1), 77-84, 1986
- KECK M.J., PALELLA T.D., PANTLE A.
MOTION AFTEREFFECT AS A FUNCTION OF THE CONTRAST OF
SINUSOIDAL GRATINGS
VISION RESEARCH, 16, 187-191, 1976
- KELLY D.H.
SPATIAL FREQUENCY SELECTIVITY IN THE RETINA
VISION RESEARCH, 15, 665-672, 1975
- KELLY D.H.
MOTION AND VISION. II. STABILIZED SPATIO-TEMPERAL THRESHOLD
SURFACE
JOSA, 69, 1340-1349, 1979
- KELLY D.H.
MANIPULATION OF TWO-DIMENSIONAL PERIODIC STIMULUS PATTERS
BEHAVIOR RESEARCH METHODS & INSTRUMENTATION, 11, 26-30,
1979
- KINCHLA R.A.
A PSYCHOPHYSICAL MODEL OF VISUAL MOVEMENT PERCEPTION
EYE-MOVEMENTS AND PSYCHOLOGICAL PROCESSES, MONTY SENDERS
EDS, 263FF, 1976
- KLINGER S.
UNTERSUCHUNGEN VON ORTSFREQUENZKANALEN DES VISUELLEN
SYSTEMS MIT STOCHASTISCHEN MUSTERN
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1985
- KOENDERINK J.J.
OPTIC FLOW
VISION RESEARCH, 26(1), 161-180, 1986
- KORN A.
BILDVERARBEITUNG DURCH DAS VISUELLE SYSTEM
FACHBERICHTE: MESSEN, STEUERN, REGELN, SPRINGER VERLAG,
1982
- KRAUSKOPF J., ZAIDI Q.
INDUCED DESENSITIZATION
VISION RESEARCH, 26(5), 759-762, 1986
- KRONAUER R.E., ZEEVI Y.Y.
REORGANIZATION AND DIVERSIFICATION OF SIGNALS IN VISION
IEEE TRANS ON SYSTEMS MAN AND CYBERNETICS, SMC-15(1),
1985
- KRUSE P., STADLER M., WEHNER T.
DIRECTION AND FREQUENCY SPECIFIC PROCESSING IN THE PERCEPTION
OF LONG-RANGE APPARENT MOTION
VISION RESEARCH, 26(22), 327-335, 1986
- KRAMER E.
ZUR ENTSTEHUNG VOLLSTÄNDIGER VISUELLER BILDEINDRÜCKE
AUS SUKZESSIV DARGEBOTENEN ELEMENTEN
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1986
- KULIKOWSKI J.J., KING-SMITH P.E.
SPATIAL ARRANGEMENT OF LINE, EDGE AND GRATING DETECTORS
REVEALED BY SUBTHRESHOLD SUMMATION
VISION RESEARCH, 13, 1455-1478, 1973
- KULIKOWSKI J.J., TOLHURST D.J.
PSYCHOPHYSICAL EVIDENCE FOR SUSTAINED AND TRANSIENT
DETECTORS IN HUMAN VISION
JOURNAL OF PHYSIOLOGY, 232, 149-162, 1973
- LABERGE D., BROWN V.
VARIATIONS IN SIZE OF THE VISUAL FIELD IN WHICH TARGETS
ARE PRESENTED: AN ATTENTIONAL RANGE EFFECT
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 40(3), 188-200, 1986
- LEE D.N.
THE OPTIC FLOW FIELD: THE FOUNDATION OF VISION
PHIL. TRANS. R. SOC. LOND., 290, 169-179, 1980
- LEE N.D., REDDISH P.E.
PLUMMETING GANNETS: A PARADIGM OF ECOLOGICAL OPTICS
NATURE, 293, 1981
- LEGGE G.E., CAMPBELL F.W.
DISPLACEMENT DETECTION IN HUMAN VISION
VISION RESEARCH, 21, 205-213
- LEGGE G.E.
SPACE DOMAIN PROPERTIES OF A SPATIAL FREQUENCY CHANNEL
IN HUMAN VISION
VISION RESEARCH, 18, 959-969, 1978
- LEGGE G.E., PELLI D.G., RUBIN G.S., SCHLESKE M.

- PSYCHOPHYSICS OF READING - I. NORMAL VISION, II. LOW VISION
VISION RESEARCH, 25(2), 239-266, 1985
- LELKENS A.M.M., KOENDERINK J.J.
ILLUSORY MOTION IN VISUAL DISPLAYS
VISION RESEARCH, 24(9), 1083-1090, 1984
- LONGUET-HIGGINS H.C., PRAZDNY K.
THE INTERPRETATION OF A MOVING RETINAL IMAGE
PROC. R. SOC. LOND., 208, 385-397, 1980
- LONGUET-HIGGINS H.C.
VISUAL MOTION AMBIGUITY
VISION RESEARCH, 26(1), 181-183, 1986
- LUCE R.D., GREEN D.M.
A NEURAL TIMING THEORY FOR RESPONSE TIMES AND THE PSYCHOPHYSICS
OF INTENSITY
PSYCHOLOGICAL REVIEW, 79(1), 14-57, 1972
- MACKAY D.M.
LETTER TO THE EDITOR: PERCEPTUAL CONFLICT BETWEEN VISUAL
MOTION AND CHANGE OF LOCATION
VISION RESEARCH, 16, 557-558, 1976
- MACLEOD I.D.G., ROSENFELD A.
THE VISIBILITY OF GRATINGS: SPATIAL FREQUENCY CHANNELS
OR BAR-DETECTING UNITS?
VISION RESEARCH, 14, 909-915
- MALLOT H.A.
AN OVERALL DESCRIPTION OF RETINOTOPIC MAPPING IN THE
CAT'S VISUAL CORTICAL AREAS 17, 18, AND 19
BIOL. CYBERN., 52, 45-51, 1985
- MANSFIELD R.J.W., NACHMIAS J.
RESEARCH NOTE: PERCEIVED DIRECTION OF MOTION UNDER RETINAL
IMAGE STABILISATION
VISION RESEARCH, 21, 1423-1425, 1981
- MARCELIJA S.
MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE RESPONSES OF SIMPLE
CORTICAL CELLS
JOSA A, 70(11), 1297-1300, 1980
- MARR D., HILDRETH E.
THEORY OF EDGE DETECTION
PROC. R. SOC. LOND., 207, 187-217, 1980
- MATHER G., CAVANAGH P., ANSTIS S.M.
A MOVING DISPLAY WHICH OPPOSES SHORT-RANGE AND LONG-RANGE
SIGNALS
PERCEPTION, 14, 163-166, 1985
- MAUNSELL J.H.R., VAN ESSEN D.C.
FUNCTIONAL PROPERTIES OF NEURONS IN MIDDLE TEMPORAL
VISUAL AREA OF THE MACAQUE MONKEY. I. SELECTIVITY FOR
STIMULUS DIRECTION, SPEED AND ORIENTATION
JOURNAL OF NEUROPHYSIOLOGY, 49(5), 1983
- MCKEE S.P.
A LOCAL MECHANISM FOR DIFFERENTIAL VELOCITY DETECTION
VISION RESEARCH, 21, 491-500, 1980
- MCKEE S.P., KLEIN S.A., TELLER D.Y.
STATISTICAL PROPERTIES OF FORCED-CHOICE PSYCHOMETRIC
FUNCTIONS: IMPLICATIONS OF PROBIT ANALYSIS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 37(4), 286-298, 1985
- MEER P., ZEEVI Y.Y.
IMPORTANCE OF GLOBAL INFORMATION IN VERNIER ACUITY
JOSA A, 3(6), 880-884, 1986
- MERBOLD U.
SPACELAB MISSION I
VORTAG IM ZT-KOLLOQUIUM DER SIEMENS AG, MÜNCHEN, PERLACH,
1984
- MEYER G.
VIDEOPROJEKTIONSANLAGE
LAUFENDE DISSERTATION AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN,
1987
- MILKMAN N., SHAPLEY R., SCHICK G.
EXPERIMENTAL APPLICATIONS: A MICROCOMPUTER-BASED VISUAL
STIMULATOR
BEHAVIOUR RESEARCH METHODS & INSTRUMENTATION (AB 81
& COMP.), 10(4), 539-545, 1978
- MILLER J.
TIMECOURSE OF COACTIVATION IN BIMODAL DIVIDED ATTENTION
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 40(5), 331-343, 1986
- MORGAN M.J.
HOW PURSUIT EYE MOVEMENTS CAN CONVERT TEMPORAL INTO SPATIAL
INFORMATION
EYE MOVEMENTS: COGNITION AND VISUAL PERCEPTION, FISHER/MONTY.,
111-133, 1981
- MORGAN M.J., WATT R.J.
MECHANISMS OF INTERPOLATION IN HUMAN SPATIAL VISION
NATURE, 299, 553-555, 1982
- MORI T.
CHANGES OF A FRAME OF REFERENCE WITH VELOCITY IN VISUAL
MOTION PERCEPTION

- PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 35(6), 515-518, 1984
- MORI T.
VISUAL CONSPICUITY OF A MOVING DOT, HORIZONTAL LINE SEGMENT
OR VERTICAL LINE SEGMENT
VISION RESEARCH, 25(8), 1083-1088, 1985
- MULLEN K.T., BAKER JR. C.L.
A MOTION AFTEREFFECT FROM AN ISOLUMINANT STIMULUS
VISION RESEARCH, 25(5), 685-688, 1985
- NAKAYAMA K., TYLER C.W.
PSYCHOPHYSICAL ISOLATION OF MOVEMENT SENSITIVITY BY
REMOVAL OF FAMILIAR POSITION CUES
VISION RESEARCH, 21, 427-433, 1980
- NAKAYAMA K.
BIOLOGICAL IMAGE MOTION PROCESSING. A REVIEW
VISION RESEARCH, 25(5), 626-660, 1985
- NAKAYAMA K., SILVERMAN G.H.
DETECTION AND DISCRIMINATION OF SINUSOIDAL GRATING DISPLACEMENTS
JOSA A, 72(2), 1985
- NEWSOME W.T., GIZZI M.S., MOVSHON J.A.
SPATIAL AND TEMPORAL PROPERTIES OF NEURONS IN MACAQUE MT
INVEST. OPHTHAL. VISUAL SCI., 24, 106, 1983
- NIKERSON R.S.
VISUAL MEMORY FOR LETTERS AND RANDOM DOT PATTERS: COULD
EYE MOVEMENT DATA HELP US UNDERSTAND IT BETTER?
EYE MOVEMENTS AND PSYCHOLOGICAL PROCESSES. MONTY SENDERS,
LOWRENCE(ERLBAUM), ASSOC.515F, 1976
- ORBAN G.A.
NEURONAL OPERATIONS IN THE VISUAL CORTEX
SPRINGER-VERLAG, BERLIN HEIDELBERG, NEW YORK, TOKYO,
1984
- PANTLE A., LEHMKUHLE S., CAUDILL M.
ON THE CAPACITY OF DIRECTIONALLY SELECTIVE MECHANISMS
TO ENCODE DIFFERENT DIMENSIONS OF MOVING STIMULI
PERCEPTION, 7, 261-267, 1978
- PASTERNAK T., MERIGAN W.H.
EFFECTS OF STIMULUS SPEED ON DIRECTION DISCRIMINATION
VISION RESEARCH, 24(10), 1349-1355, 1984
- PASTERNAK T., LEINEN L.J.
PATTERN AND MOTION VISION IN CATS WITH SELECTIVE LOSS
OF CORTICAL DIRECTIONAL SELECTIVITY
THE JOURNAL OF NEUROSCIENCE, 6(5), 938-945, 1986
- PENTLAND A.
NOTES AND COMMENT: MAXIMUM LIKELIHOOD ESTIMATION. THE
BEST PEST
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 28(4), 377-379, 1980
- PERIZONIUS E.
LAUFENDE EXPERIMENTE ZUR FARBWahrNEHMUNG
PERSONLICHE MITTEILUNG, 1987
- PETERSIK J.T.
THE EFFECTS OF SPATIAL AND TEMPORAL FACTORS ON THE PERCEPTION
OF STROBOSCOPIC ROTATION SIMULATIONS
PERCEPTION, 9, 271-283, 1980
- PETERSIK J.T., BORING M., MCDILL M.
CORRESPONDENCE STRENGTH ON APPARENT MOVEMENT AS A FUNCTION
OF SHORT-RANGE AND LONG-RANGE PROCESSES: COMMENTS ON
ULLMAN (1980)
PERCEPTION, 11, 743-746, 1982
- PETERSIK J.T.
THE PERCEPTUAL FATE OF LETTERS IN TWO KINDS OF APPARENT
MOVEMENT DISPLAYS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 36(2), 146-150, 1984
- PETERSIK J.T.
GROUP MOVEMENT PRODUCED BY THE SHORT RANGE PROCESS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 39(6), 445-446, 1986
- PIWERNETZ K., ECK B., DERLICH H., GERBER K.
FARBBLIMMERPHOTOMETRIE BEI DIABETES MELLITUS
EUROPEAN DIABETES CONFERENCE, MADRID, 1985
- PIERON H.
NOUVELLES RECHERCHES SUR L'ANALYSE DU TEMPS DE LATENCE
SENSORIALE ET SUR LA LOI QUI RELIE CE TEMPS A L'INTENSITE
DE L'EXCITATION
ANNEE PSYCHOLOGIQUE, 22, 58-142, 1920
- POST R.B., SCOBEE R.P., JOHNSON C.A.
EFFECTS OF RETINAL ECCENTRICITY ON DISPLACEMENT THRESHOLDS
FOR UNIDIRECTIONAL AND OSCILLATORY STIMULI
VISION RESEARCH, 24(8), 835-839
- POWER R.P.
APPARENT MOVEMENT INDUCED BY AFTERIMAGES
PERCEPTION, 12, 463-467, 1983
- PULVERMACHER H., HILZ R.
A NEW SYSTEM FOR CORRECTION CHROMATIC ABERRATIONS OF THE EYE
WORLD CONGRESS ON MED. PHYS. AND BIOMED. ENGINEERING, HAMBURG,
1982
- RAMACHANDRAN V.S., ANSTIS S.M.

- PERCEPTUAL ORGANIZATION IN MOVING PATTERNS
NATURE, 304, 529-531, 1983
- RAMACHANDRAN V.S., ANSTIS S.M.
EXTRAPOLATION OF MOTION PATH IN HUMAN VISUAL PERCEPTION
VISION RESEARCH, 23, 83-85, 1983
- RAMACHANDRAN V.S., ANSTIS S.M.
PERCEPTUAL ORGANIZATION IN MULTISTABLE APPARENT MOTION
PERCEPTION, 14, 135-143, 1985
- RAMACHANDRAN V.S., INADA V., KIAMA G.
PERCEPTION OF ILLUSORY OCCLUSION IN APPARENT MOTION
VISION RESEARCH, 26(10), 1741-1749, 1986
- RAYNER K., POLLATSEK A.
IS VISUAL INFORMATION INTEGRATED ACROSS SACCADIC ?
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 34(1), 39-48, 1983
- READER C., HUBBLE L.
TRENDS IN IMAGE DISPLAY SYSTEMS
PROCEEDING OF THE IEEE, 69(5), 1981
- REGAN D.
VISUAL PROCESSING OF FOUR KINDS OF RELATIVE MOTION
VISION RESEARCH, 26(1), 127-145, 1986
- REICHARDT W.
AUTOCORRELATION, A PRINCIPLE FOR THE EVALUATION OF SENSORY
INFORMATION BY THE CENTRAL NERVOUS SYSTEM
SENSORY COMMUNICATION, WILEY, NY, ED. ROSENBLITH W.A.,
1961
- RICHTER J., ULLMAN S.
A MODEL FOR THE TEMPORAL ORGANIZATION OF Z- AND Y-TYPE
RECEPTIVE FIELDS IN THE PRIMATE RETINA
BIOL. CYBERN., 43, 127-145, 1982
- RICHTER J., ULLMAN S.
ARE NON-DIRECTIONAL SIMPLE CELLS CONSTRUCTED FROM DIRECTIONAL
SUBUNITS
BIOL. CYBERN., 54, 313-317, 1986
- ROBINSON D.A., GORDON J.L., GORDON S.E.
A MODEL OF THE SMOOTH PURSUIT EYE MOVEMENT SYSTEM
BIOL. CYBERN., 55, 43-57, 1986
- ROBSON J.G.
FREQUENCY DOMAIN VISUAL PROCESSING
BRADDOCK SLEIGHT SPRINGER VERLAG, PHYS. BIOL. PROC.
OF IMAGE, 72-87, 1983
- ROGAL L., FISCHER B.
EYE-HAND-COORDINATION: A MODEL FOR COMPUTING REACTION
TIMES IN A VISUALLY GUIDED REACH TASK
BIOLOGICAL CYBERNETICS, 55(4), 263-, 1986
- ROGERS B., GRAHAM M.
SIMILARITIES BETWEEN MOTION PARALLAX AND STEREOPSIS
IN HUMAN DEPTH PERCEPTION
VISION RESEARCH, 22, 261-270, 1982
- ROVAMO J., VIRSU V.
AN ESTIMATION AND APPLICATION OF THE HUMAN CORTICAL
MAGNIFICATION FACTOR
EXPERIMENTAL BRAIN RESEARCH, 37, 495-510, 1979
- RULE S.J.
SUBJECTIVE DURATION OF SIMULTANEOUS EVENTS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 40(1), 27-30, 1986
- RÖHLER R.
CONTROLLED LATERAL SHIFTS: A METHOD OF REDUCING SPATIAL
NOISE IN DETECTOR ARRAYS
OPTICA ACTA, 26(11), 1407-1414, 1979
- RÖHLER R.
SENSITIVITY VARIATIONS IN THE VISUAL SYSTEM, CONTRAST
RESOLUTION AND EYE MOVEMENTS
BIOL. CYBERN., 32, 101-106, 1979
- RÖHLER R., VEY A., KLINGER S.
SPATIAL AND TEMPORAL EXTENSION OF SO CALLED SPATIAL
FREQUENCY CHANNELS
8. EUROPEAN VISION CONFERENCE ON VISUAL PERCEPTION,
VALENCIA, 1985
- RÖHLER R., KRAMER E.
RECOGNITION OF MOVING STRUCTURES WHICH ARE MASKED BY
WINDOWS
9. EUROPEAN VISION CONFERENCE, BAD NAUHEIM, WEST GERMANY,
1986
- RÖHLER R.
THE DETECTION OF MOVING OPTICAL STRUCTURES WHEN USING
DETECTOR ARRAYS SUFFERING FROM SPATIAL NOISE
PERSÖNLICHE MITTEILUNG, 1981
- SACHS M.B., NACHMIAS J., ROBSON J.G.
SPATIAL-FREQUENCY CHANNELS IN HUMAN VISION
JOSA A, 61(9), 1971
- SAGI D., HOCHSTEIN S.
LATERAL INHIBITION BETWEEN SPATIALLY ADJACENT SPATIAL-FREQUENCY
CHANNELS ?
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS, 37(4), 315-322, 1985

- SAJUK T.O.
AUFBAU EINES INTELLIGENTEN VERSUCHSINTERFACE FÜR PSYCHO-
PHYSIKALISCHE EXPERIMENTE
PRAKTIKUM AM INST. F. MED. OPTIK. 1981
- SAJUK T.O.
HFMG
LAUFENDE DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK. 1987
- SALEH B.E.A., TULLNAY-KESSEY U.E.
A MODEL FOR THE FADING OF STABILIZED IMAGES IN A VISUAL SYSTEM
IEEE TRANS. ON SMC. SMC-16(1), 1986
- SCHOBER H.
DAS SEHEN
VEB FACHBUCHVERLAG LEIPZIG, 1954, 1960, 1970, I + II.
1970
- SCHUMACHER W., KORN A.
AUTOMATIC EVALUATION OF EYE OR HEAD MOVEMENTS FOR VISUAL
INFORMATION SELECTION
ITB 9545, FRAUNHOFER INTS. F. INFORMATIONS U. DATENVERARB.
- SCHWAB R.
ENTWURF UND AUFBAU EINER APPARATUR ZUR MESSUNG VON AUGEN-
BEWEGUNGEN
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK. LMU MÜNCHEN, 1983
- SCHWARTZ E.L.
CORTICAL ANATOMY, SIZE INVARIANCE, AND SPATIAL FREQUENCY
ANALYSIS
PERCEPTION. 10, 455-468, 1981
- SCOBIE R.P., JOHNSON C.A.
DISPLACEMENT THRESHOLDS FOR UNIDIRECTIONAL AND OSCILLATING
MOVEMENT
VISION RESEARCH. 21, 1297-1302, 1981
- SCRINIVASAN M.V., LAUGHLIN S.B., DEBS A.
PREDICTIVE CODING: A FRESH VIEW OF INHIBITION IN THE
RETINA
PROC. R. SOC. LOND., 216, 427-459, 1982
- SEELEN VON W.
ZUR INFORMATIONSVERARBEITUNG IM VISUELLEN SYSTEM DER
WIRBELTIERE I.
KYBERNETIK. VII(2), 1970
- SHAW G., RAMACHANDRAN V.S.
INTERPOLATION DURING APPARENT MOTION
PERCEPTION. 11, 491-494, 1982
- SHAW M.L.
A CAPACITY ALLOCATION MODEL FOR REACTION TIME
J. OF EXP. PSYCHOLOGY: HUMAN PERCEPTION AND PERFORMANCE,
4(4), 586-598, 1978
- SHULMAN G.L., REMINGTON R.W., MCLEAN J.P.
MOVING ATTENTION THROUGH VISUAL SPACE
J. OF EXP. PSYCHOLOGY: HUMAN PERCEPTION AND PERFORMANCE,
5(3), 522-526, 1979
- SIMMERL H.
LOKALE ORTSFREQUENZANALYSE DES VISUELLEN SYSTEMS. NACHGEWIESEN
MIT HILFE VON GABORFUNKTIONEN.
ZULASSUNGSARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK. LMU MÜNCHEN,
1983
- SIXTL F.
MESSMETHODEN DER PSYCHOLOGIE
VERLAG JULIUS BELTZ, WEINHEIM BERGSTRASSE, 1967
- SKOTTUN B.C.
CONTRAST DISCRIMINATION BETWEEN STIMULI OF ORTHOGONAL
ORIENTATIONS
PERCEPTION & PSYCHOPHYSICS. 38(2), 194-197, 1985
- SMITH A.T., MUSSELWHITE M.J., HAMMOND P.
THE INFLUENCE OF BACKGROUND MOTION ON THE MOTION AFTEREFFECT
VISION RESEARCH. 24(9), 1075-1082, 1984
- STERNBERG S.
MEMORY-SCANNING. MENTAL PROCESSES REVEALED BY REACTION-TIME
EXPERIMENTS
AMERICAN SCIENTIST. 57(4), 421-457, 1969
- SUBOTIC N., SALEH B.E.A.
GENERATION OF THE WIGNER DISTRIBUTION FUNCTION OF TWO-
DIMENSIONAL SIGNALS BY A PARALLEL OPTICAL PROCESSOR
OPTICS LETTERS. 9(10), 471-473, 1984
- TAYLOR C.J., BRUNT J.N.H., DIXON R.N., GREGORY P.J.
DESIGNING AND IMPLEMENTING AN ALGORITHM TO EXTRACT MOTION
INFORMATION FROM IMAGES
BRADDICK/SLEIGH, PHYS. A. DIOL. PROC. OF IMAGES, SPRINGER,
1983
- TAYLOR M.M., CREELMAN C.D.
PEST: EFFICIENT ESTIMATES ON PROBABILITY FUNCTIONS
THE JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 41(4),
782-787, 1967
- TAYLOR M.M., FORBES S.M., C.D. CREELMAN
PEST REDUCES BIAS IN FORCED CHOICE PSYCHOPHYSICS
JOURNAL OF THE ACOUSTIC SOCIETY OF AMERICA, 74(5), 1367-1374,

- 1983
TAYLOR M.M., FORBES S.M.
PEST REDUCES BIAS IN FORCED CHOICE PSYCHOPHYSICS
JOURNAL OF THE ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 74(5),
1367-1374, 1983
- TEICHNER W.H., KREBS M.J.
LAWS OF THE SIMPLE VISUAL REACTION TIME
PSYCHOLOGICAL REVIEW, 79(4), 344-358, 1972
- TENGLER W.
BEWEGTBILDCODES ALS SYSTEMKOMPONENTEN FÜR DIE DIGITALE
BREITBANDKOMMUNIKATION
SIEMENS BERICHT, A.Z. INF 1-24.84 TE.AF, 1984
- THOMPSON P.G.
VELOCITY AFTEREFFECTS AND THE PERCEPTION OF MOVEMENT
PH. D. THESIS, UNIVERSITY OF CAMBRIDGE, UK, 1976
- TOLHURST D.J.
SEPARATE CHANNELS FOR THE ANALYSIS OF THE SHAPE AND
THE MOVEMENT OF A MOVING VISUAL STIMULUS
JOURNAL OF PHYSIOLOGY, 231, 385-402, 1973
- TOLHURST D.J.
REACTION TIMES IN THE DETECTION OF GRATINGS BY HUMAN
OBSERVER: A PROBABILISTIC MECHANISM
VISION RESEARCH, 15, 1143-1149, 1975
- TORRE V., POGGIO T.A.
ON EDGE DETECTION
IEEE TRANS. ON PAMI, PAMI-8(2), 147-163, 1986
- TSAL Y.
MOVEMENTS OF ATTENTION ACROSS THE VISUAL FIELD
J. OF EXP. PSYCHOLOGY: HUMAN PERCEPTION AND PERFORMANCE,
9(4), 523-530, 1983
- TSOTSOS J.K., MYLOPOULOS J., COVVEY H.D., ZUCKER S.W.
A FRAMEWORK FOR VISUAL MOTION UNDERSTANDING
IEEE TRANS. ON PATTERN ANALYSIS AND MACHINE INTELLIGENCE,
PAMI-2(6), 1980
- TURNER M.R.
TEXTURE DISCRIMINATION BY GABOR FUNCTIONS
BIOL. CYBERN., 55, 71-82, 1986
- TYNAN P.D., SEKULER R.
MOTION PROCESSING IN PERIPHERAL VISION: REACTION TIME
AND PERCEIVED VELOCITY
VISION RESEARCH, 22, 61-68, 1982
- UENO T.
VISIBLE PERSISTENCE: EFFECTS OF LUMINANCE, SPATIAL FREQUENCY
AND ORIENTATION
VISION RESEARCH, 23(12), 1687-1692, 1983
- ULLMAN S.
TWO DIMENSIONALITY OF THE CORRESPONDENCE PROCESS IN
APPARENT MOTION
PERCEPTION, 7, 683-693, 1978
- ULLMAN S.
THE INTERPRETATION OF VISUAL MOTION
MIT PRESS, CAMBRIDGE, MASSACHUSETTS, AND LONDON, ENGLAND,
BOOK 1979
- ULLMAN S.
THE EFFECT OF SIMILARITY BETWEEN LINE SEGMENTS ON THE
CORRESPONDENCE STRENGTH IN APPARENT MOTION
PERCEPTION, 9, 617-626, 1980
- ULLMAN S.
ANALYSIS OF VISUAL MOTION BY BIOLOGICAL AND COMPUTER
SYSTEMS
IEEE COMPUTER, 1981
- ULLMAN S., HILDRETH E.C.
THE MEASUREMENT OF VISUAL MOTION
BRADDICK, SLEIGH, PHYS. A. BIOL. PROC. OF IMAGES, SPRINGER,
154-176, 1983
- VAN DOORN A.J.
ASPECTS OF VISUAL MOVEMENT DETECTION
DISSERTATION, VAN DOORN, 1983
- VAN DOORN A.J., KOENDERINK J.J., VAN DE GRIND W.A.
PERCEPTION OF MOVEMENT AND CORRELATION IN STROBOSCOPICALLY
PRESENTED NOISE PATTERN
PERCEPTION, 14, 209-224, 1985
- VEY A.
UNTERSUCHUNGEN ÜBER DIE EIGENSCHAFTEN VON LOKALEN
ORTSFREQUENZKANÄLE DES VISUELLEN SYSTEMS
DIPLOMARBEIT AM INST. F. MED. OPTIK, LMU MÜNCHEN, 1984
- WATSON A.B., AHUMADA A.J.
A LOOK AT MOTION IN THE FREQUENCY DOMAIN
NASA TECHNICAL MEMORANDUM, 82352, 1983
- WATSON A.B., AHUMADA JR. A., FARRELL J.E.
THE WINDOW OF VISIBILITY: A PSYCHOPHYSICAL THEORY OF
FIDELITY IN TIME-SAMPLED VISUAL MOTION DISPLAYS
NASA TECHNICAL PAPER 2211, JOSA A, MARCH 1986, 3(3),
1983

- WATSON A.B., BARLOW H.B., ROBSON J.G.
WHAT DOES THE EYE SEE BEST ?
NATURE, 302, 419-422, 1983
- WATSON A.B.
APPARENT MOTION OCCURS ONLY BETWEEN SIMILAR SPATIAL
FREQUENCIES
VISION RESEARCH, 26(10), 1727-1730, 1986
- WEERT DE C.M.M., WADE N.J.
RESEARCH NOTE: CANCELLING OF PATTERN MOTION: DICHOTIC
AND MONOPTIC OBSERVATIONS
VISION RESEARCH, 24(8), 883-887, 1983
- WIDDER D.V.
THE HEAT EQUATION
ACADEMIC PRESS, NEW YORK, SAN FRANCISCO, LONDON, 1975
- WILLIAMS D., PHILLIPS G., SEKULER R.
HYSTERESIS IN THE PERCEPTION OF MOTION DIRECTION AS
EVIDENCE FOR NEURAL COOPERATIVITY
NATURE, 324, 253-255, 1986
- WILSON H.R.
PSYCHOPHYSICAL EVIDENCE FOR SPATIAL CHANNELS
BRADDICK SLEIGH, PHYS. A. BIOL. PROC OF IMAGES, SPRINGER-V.,
1983
- WILSON H.R.
A MODEL FOR DIRECTION SELECTIVITY IN THRESHOLD MOTION
PERCEPTION
BIOL. CYBERN., 51, 213-222, 1985
- WILSON S.W.
ON THE RETINO-CORTICAL MAPPING
INT. J. MAN-MACHINE STUDIES, 18, 361-389, 1983
- WITTEBROOD J.E.M., WANSINK M.G., WEERT DE C.M.M.
A VERSATILE COLOUR STIMULUS GENERATOR
PERCEPTION, 10, 63-69, 1981
- WOLF W., HAUSKE G., LUPP U.
HOW PRESACCADIC GRATINGS MODIFY POSTSACCADIC MODULATION
TRANSFER FUNCTION
VISION RESEARCH, 18, 1173-1179, 1978
- WOLF W., HAUSKE G., LUPP U.
INTERACTION OF PRE- AND POSTSACCADIC PATTERNS HAVING
THE SAME COORDINATES IN SPACE
VISION RESEARCH, 20, 117-125, 1980
- WRIGHT M.J., JOHNSTON A.
SPATIO-TEMPORAL CONTRAST SENSITIVITY AND VISUAL FIELD
LOCS
VISION RESEARCH, 23(10), 983-989, 1983
- WRIGHT M.J., JOHNSTON A.
THE RELATIONSHIP OF DISPLACEMENT THRESHOLDS FOR OSCILLATING
GRATINGS TO CORTICAL MAGNIFICATION, SPATIO-TEMPORAL
FREQUENCY AND CONTRAST
VISION RESEARCH, 25(2), 187-193, 1985
- YAMADA M., FUKUDA T.
QUANTITATIVE EVALUATION OF EYE MOVEMENTS AS JUDGED BY
SIGHT-LINE DISPLACEMENTS
SMPTA JOURNAL, 95(12), 1230-1241, 1986
- ZEEVI Y.Y., MANGOLBI S.S.
VERNIER ACUITY WITH NOISY LINES. ESTIMATION OF RELATIVE
POSITION UNCERTAINTY
BIOL. CYBERN., 50, 371-376, 1984
- ZIHL J., CRAMON VON D., MAI N.
SELECTIVE DISTURBANCE OF MOVEMENT VISION AFTER BILATERAL
BRAIN DAMAGE
BRAIN, 106, 313-340, 1983
- ZUCKER S.W.
COMPUTER VISION AND HUMAN PERCEPTION
PROC. INT. JOINT. CONFERENCE ON AI, VANCOUVER, 1102-1116,
1981
- ZUCKER S.W., HUMMEL R.A.
RECEPTIVE FIELDS AND THE REPRESENTATION OF VISUAL INFORMATION
HUMAN NEUROBIOL., 5, 121-128, 1986

Teile dieser Arbeit wurden bereits in folgenden Postern oder Tagungsvorträgen veröffentlicht:

- GERBER K., SCHILL W.
DIGITALER FARBMUSTERGENERATOR
POSTER, DGAO-TAGUNG, ISNY, WEST GERMANY, 1984
- GERBER K.
STÜTZT SICH DIE VISUELLE BEWEGUNGSWAHRNEHMUNG AUF LOKALE GESCHWINDIGKEITSELEMENTE ODER AUF DIE INTERPOLATION VON LAGE-INFORMATIONEN DES OBJEKTS ZU VERSCHIEDENEN ZEITEN ?
VORTRAG, DGAO-TAGUNG, ISNY, WEST GERMANY, 1984
- PIWERNETZ K., ECK B., DERLICH H., GERBER K.
FARBFLIMMERPHOTOMETRIE BEI DIABETES MELLITUS
VORTRAG, EUROPEAN DIABETES CONFERENCE, MADRID, 1985
- GERBER K., DERLICH H.
PSYCHOPHYSICAL THRESHOLD ESTIMATION OF SPATIAL - FREQUENCY AND ORIENTATION BANDWIDTH WITH ELLIPTIC GABORSIGNALS
VORTRAG, DGAO-TAGUNG, DEN HAAG, 1986
- GERBER K., RÖHLER R.
MOTION DETECTION IS INFLUENCED BY THE PRESENCE OF AN INDUCING MOTION
POSTER, 9. EUROPEAN VISION CONFERENCE, BAD NAUHEIM, 1986

8. Anhang B: FMG-Programmierbeispiele

Die Hardware-Strukturen des Farbmustergenerators (FMG) können mit den Type-Deklarationen der Programmiersprache Pascal einfach und selbsterklärend geschrieben werden. Die angeführten Prozeduren und Programme sollen nur zur Illustration dienen und die einfache Realisation von Versuchsprogrammen unterstreichen. Das oben erwähnte Queue-Management wird hier nicht berücksichtigt, da es zum Verständnis des Aufbaus des Farbmustergenerators nichts beitragen kann. Der Queue-Mechanismus erlaubt zusätzlich das Abspeichern von Kommandosequenzen, die dann mit einem einzigen Kommando gestartet werden und dem Benutzer sofort wieder die Programmkontrolle übertragen. Die FMG-Befehle führt der Device-Treiber und das Betriebssystem transparent für alle Computerbenutzer als Hintergrundprozeß aus.

Der Deklarationsteil formuliert den FMG als Pascal-Record (siehe auch Bild 3.4.1):

```

TYPE
{ Wertebereiche }
  Adress_bereich      = 0..255;
  Pixel_bereich       = 0..255;
  Video_spannung      = 0..1023;
  Bildgruppen_bereich = 1..2;
  Bild_bereich        = 1..4;
  Funktionsgruppen_bereich = 1..2;
  Operator_bereich    = 1..4;
  Pfad_nummer         = 0..216;
  Zähler_takt         = (Zeit, X_adresse, Y_adresse);
  Farbe               = (rot, grün, blau);
{ Strukturen }
  Pixel_adresse = ARRAY [1..2] OF Pixel_bereich;
VAR
  fmg: RECORD
    Bildgruppe: ARRAY [Adress_bereich, Adress_bereich] OF
      RECORD
        Bild: ARRAY [Bild_bereich] OF Bild_type;
        RECORD
          Offset_register: Pixel_adresse;
        END;
        RECORD
          Offset_speicher: ARRAY [Adress_bereich]
            OF Pixel_adresse;
        END;
      END;
    Funktionsgruppe: ARRAY [Funktionsgruppen_bereich] OF
      RECORD
        Funktion: ARRAY [Adress_bereich] OF Pixelbereich;
        Adressquellen: Zähler_takt;
      END;
    Farbspeicher: ARRAY [Adress_bereich, Farbe] OF
      Video_spannung;
    Umfeldregister: Adress_bereich;
    Pixelprogramm:
      RECORD
        Operator: ARRAY [Operator_bereich] OF
          (add, sub, mul, div, and...);
        Datenweg: Pfad_nummer;
      END;
  END;
END;

```

Mit folgenden kurz skizzierten Procedures lassen sich einfache Versuchsprogramme zusammenstellen:

```
PROCEDURE Set_kontrast(kontrast : INTEGER);
```

Diese Procedure lädt den Funktionsspeicher fmg.Funktionsgruppe[] mit dem Wert "kontrast".

```
PROCEDURE Compute_Grating(f : Ortsfrequenz);
```

Diese Procedure berechnet die Sinus-Funktion für die Ortsfrequenz f und alle Bildpunkte. Die in Maschineneinheiten transformierten Werte werden in fmg.Bildgruppe[1].Bild[1] geladen.

```
PROCEDURE Warte_auf_Bildanfang;
```

Diese Procedure verzögert den Programmlauf bis zum Anfang des nächsten Bildes. Sie wird für bildsynchrone Operationen benötigt. (Das Queue-Management des Device-Treibers macht die Procedure überflüssig, da im Normalfall Benutzer-Unterprogramme nur über den Treiber Zugriff auf die FMG-Hardware erhalten.)

```
PROCEDURE Signal_ready;
```

Diese Procedure signalisiert der Versuchsperson durch einen Ton den Beginn der Messung. Dazu wird der Lautsprecher des intelligenten Versuchsin-terfaces (IVI) aktiviert.

```
FUNCTION Get_Button(Tasten_nummer : 1..8) : BOOLEAN;
```

Diese Funktion hat den Wert TRUE, falls am IVI die durch Tasten_nummer ausgewählte Eingabe-Taste betätigt wird.

```
PROCEDURE Get_angle_position(VAR position : INTEGER);
```

Diese Procedure übergibt in der Variablen "position" die Stellung des Winkelkodierers (Pseudoanalogeingabe) am IVI.

```
PROCEDURE Load_Farbspeicher(fa, fe : Video_spannung);
```

Diese Procedure berechnet unter Berücksichtigung der Gamma-Verzerrung des Monitors die zum Laden der Farbspeicher nötigen Werte. Das Testgitter soll entlang eines Weges im Farbraum moduliert werden. Die Endpunkte des Weges entsprechen den kleinsten und größten Farbspeicheradresswerten die der Pixelprozessorausgang liefert. Die Zwischenwerte werden durch lineares Interpolieren ermittelt.

Der Pixelprozessor berechnet im Zweierkomplement kodierte vorzeichen-behaftete Daten. Die Modulo-256-Operation bildet diese Daten auf den posi-tiven Adressraum des Farbspeichers ab.

```
fmg.Farbspeicher[pixout mod 256, Farbe] :=  
  fa[Farbe].(pixout/128+1)/2 + fe[Farbe] * (1-pixout/128)/2
```

Der Pixelprozessor verrechnet jeweils 2*8 Bit zu einem 16-Bit Wort. Der Eingang für die nächste Operaterstufe verwendet jedoch nur die oberen 8 Bit des 16 Bit Resultats und führt somit Implizit eine Division durch 2⁸ (=128) durch.

```
PROCEDURE Load_Pixelprogrammregister(Command : STRING);
```

Diese Procedure ermittelt aus dem Kommando-String das zugeordnete binäre Pixelprogramm und lädt damit das Pixelprogrammregister zur Steuerung des Datenwegs.

```
PROCEDURE load_Offsetspeicher(gruppe:(1,2); v: Pixel_adresse);
```

Diese Procedure lädt den Offset-Speicher mit Bildstartpositionen, die zur gleichmäßigen Bewegung des Bildes Bildgruppe[n] (n=1,2) nötig sind. Der Parameter v bestimmt dabei die Verschiebungsgeschwindigkeit des Musters.

```
PROCEDURE Initialize_fmg;
```

Nach dem Aufruf dieser Procedure ist ein wohldefinierter Ausgangszustand des Farbmustergenerators gegeben.

Einige Beispiele sollen nun die Programmierung des Farbmustergenerators demonstrieren.

Zur Messung der Farbkontrastschwelle von bewegten Sinus-Gittern wird der Farbmustergenerator nach folgendem Schema programmiert:

```
{ **** Versuchsprogramm zur Kontrastschwellenbestimmung **** }
BEGIN
  Initialize_fmg;
  load_Farbspeicher(fa,fe);
  load_Pixelprogrammregister
    ('(Bildgruppe[1].Bild[1] <mul> Funktionsgruppe[1])');
  READ(f);
  Compute_Grating(f);
  READ(v); { v : Geschwindigkeit in Pixel pro 20ms }
  load_Offsetspeicher(1,v);
  Set_Kontrast(0);
  Signal_ready;
  REPEAT
    Get_angle_position(Kontrast);
    Warte_auf_Bildanfang;
    Set_Kontrast(Kontrast);
  UNTIL Get_button(1);
  PRINT(f,Kontrast);
END.
```

Ein typisches Adaptationsexperiment mit einer Schwellenbestimmung durch die Staircase-Methode (CORNSEWET, 1962) läßt sich wie folgt formulieren:

```
PROCEDURE Staircase(Antwort: BOOLEAN; VAR Kontrast : INTEGER);
```

Diese Procedure ermittelt den Testgitterkontrast in Abhängigkeit von der Variablen "Antwort". Nach Ablauf der Meßreihe werden die Resultate in einer Datei gespeichert.

```
PROCEDURE Compute_Hüllkurven;
```

Innerhalb eines quadratischen Gebiets des fmg.Bildgruppe[2].Bild[1] wird jedes Pixel auf den Wert 255 gesetzt, außerhalb auf null. Diese Maske kann über die Offset-Register verschoben werden, und so der Ausschnitt des Musters in fmg.Bildgruppe[1].Bild[1] ausgewählt und begrenzt werden.

```

BEGIN
  Initialize_fm;
  load_Farbspeicher(fa, fe);
  load_Pixelprogrammregister
    ('Bildgruppe[2].Bild[1] <and> ( Bildgruppe[1].Bild[1]
                                     <mul> Funktionsgruppe[1] ) ');
  READ(f,v); { f:Ortsfrequenz, v:Geschwindigkeit Pixel/20ms }
  Compute_Grating(f);
  Compute_Hüllkurven;
  Test_Kontrast := Max_Kontrast;
  REPEAT
  { Start Adaptationsphase }
    WITH fmg.Bildgruppe[2] DO
      Offset_register := Adaptations_Fenster_Position;
      Set_Kontrast(Max_Kontrast);
      Signal_ready;
      Warte_auf_Bildanfang;
      Set_Kontrast(0);
    { Ende Adaptationsphase }
      WITH fmg.Bildgruppe[2] DO
        Offset_register := Test_Fenster_Position;
      { Start Testphase }
        Set_Kontrast(Test_Kontrast);
        Signal_ready;
        Warte_auf_Bildanfang(Test_Dauer);
        Set_Kontrast(0);
      { Ende Testphase }
        Staircase(Get_Button(1), Test_Kontrast);
      UNTIL Versuchsende;
  END.

```

Das Abbruchkriterium "Versuchsende" kann z.B. aus einer festgesetzten Anzahl von Versuchsdurchläufen oder aus dem Erreichen eines Fehlergrenzwertes für die Schwelle bestehen. Ein Experiment mit Gabor-Funktionen als Adaptations- und Testreiz benutzt die oben beschriebene Programmstruktur. Es gilt folgenden zweidimensionalen Reiz zu erzeugen (siehe auch VEY, 1984):

$$\text{Kontrast} \cdot \text{Gauß}(\sigma_{\text{Zeit}}, t) \cdot \text{Gauß}(\sigma_{\text{Ort}}, r) \cdot \cos(2\pi \cdot f(r-vt))$$

Hierin legt die zeitabhängige Gaußfunktion den Zeitverlauf des dargebotenen Bildkontrastes fest. Der Farbmustergenerator realisiert diesen Reiz mit der Speicherbelegung:

<u>Speicher</u>	<u>Inhalt</u>
& fmg.Bildgruppe[1].Bild[1]	<-- $\cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot r)$
fmg.Bildgruppe[1].offset_speicher	<-- $v \cdot t$
& fmg.Bildgruppe[2].Bild[1]	<-- $\text{Gauß}(\sigma_{\text{Ort}}, r)$
& fmg.Funktionsgruppe[1].Funktion	<-- Kontrast
& fmg.Funktionsgruppe[2].Funktion	<-- $\text{Gauß}(\sigma_{\text{Zeit}}, t)$
fmg.Funktionsgruppe[2].Adressquellen	<-- Zeit

Die mit (&) gekennzeichneten Speicher verknüpft der Pixelprozessor:

```
Load_Pixelprogrammregister
('Bildgruppe[2].Bild[1] <mul> Bildgruppe[1].Bild[1] <mul>
Funktionsgruppe[1] <mul> Funktionsgruppe[2]')
```

Für Untersuchungen mit örtlich-zeitlich bandbegrenztem Rauschen ist die Darstellung von längeren Folgen unabhängiger Einzelbilder notwendig. Bei einer Beschränkung des Bildausschnittes von 64x64 Pixeln besteht die Folge aus maximal 128 Bildern, oder entsprechend 2.5 Sekunden. Die Speicherbelegung des Farbmustergenerators nimmt dazu folgende Gestalt an (siehe auch KLINGER, 1985):

<u>Speicher</u>	<u>Inhalt</u>
fmg.Bildgruppe[1]	<-- 16x4 Einzelbilder
fmg.Bildgruppe[2]	<-- 16x4 Einzelbilder
fmg.Funktionsgruppe[1].Funktion	<-- Elemente 0..63: 255 Elemente 64..255: 0
fmg.Funktionsgruppe[1].Adressquellen :=	X_adresse
fmg.Funktionsgruppe[2].Funktion	<-- Elemente 0..63: 255 Elemente 64..255: 0
fmg.Funktionsgruppe[2].Adressquellen :=	Y_adresse

```
BEGIN
  FOR gruppe:=1 TO 2 DO
    FOR nummer:=1 TO 4 DO BEGIN
      load_Pixelprogrammregister
      ('Bildgruppe[gruppe].Bild[nummer] <and>
      Funktionsgruppe[1] <and> Funktionsgruppe[2]');
      FOR x:=1 TO 4 DO
        FOR y:=1 TO 4 DO BEGIN
          Warte_auf_Bildanfang;
          load_Offsetregister(gruppe,64*(x-1),64*(y-1))
        END;
      END;
    END;
  END.
```

Die Architektur des Farbmustergenerators erlaubt es ohne externe Rechnerunterstützung rotierende Figuren zur Untersuchung von Bewegungsnacheffekten zu erzeugen (siehe auch HESS, 1986). Der Reiz soll aus einer bewegten logarithmischen Spirale bestehen:

```
Logspirale(a,b) := a * phi + b * ln(|r|)
mit
  phi : Winkel zwischen r und der Horizontalen
  r   : Vektor mit Ursprung in Bildmitte
```

Der Pixelprozessor berechnet folgenden Ausdruck:

$$(\text{Logspirale}(a,b) + (c \cdot t)) \bmod 256$$

Diese Operationen führen zu einer Rotation der logarithmischen Spirale, denn es gilt:

$$\text{Logspirale}(a,b) + c \cdot t = a \cdot (\phi + c/a \cdot t) + b \cdot \ln(|r|).$$

Periodische Spiralen ergeben sich mit einer periodischen Funktion in den Farbspeichern. Die Parameter a und b bestimmen die Krümmung, c die Rotationsgeschwindigkeit der Spiralen:

<u>Speicher</u>	<u>Inhalt</u>
& fmg.Bildgruppe[1].Bild[1]	<-- Logspirale(a,b)
& fmg.Funktionsgruppe[1].Funktion	<-- $c \cdot t$
fmg.Funktionsgruppe[1].Adressquellen	<-- Zeit
fmg.Farbspeicher	<-- z.B. periodische Rechteckfunktion
Load_Pixelprogrammregister	
('Bildgruppe[1].Bild[1] <add> Funktionsgruppe[1].Funktion')	

Rotationen lassen sich allgemein durch das Füllen eines Bildspeichers mit winkelabhängigen Funktionen erreichen, z.B. $\arctan(y/x)$. Bild 9.1 zeigt diese Funktion als 3d-Graphik.

In Bild 8.1 besitzen radiale Strahlen für ein festes z konstante Pixelwerte mit denen die Farbspeicher adressiert werden. Ein Farbspeicherinhalt ungleich null an der adressierten Stelle erzeugt eine vom Bildzentrum ausgehende Linie. Addiert man im Pixelprozessor jetzt eine zeitabhängige Funktion aus z.B. fmg.Funktionsgruppe[1] auf die Figur von Bild 8.1, so nimmt die Linie bei einer linearen Zeitfunktion nacheinander alle im Raster erreichbaren Winkelpositionen zwischen 0° und 360° ein. Die Steigung der Zeitfunktion bestimmt die Rotationsgeschwindigkeit der Linie. Ein Setzen weiterer Farbspeicherzellen erzeugt zusätzliche Linien, die ebenfalls nach der Zeitfunktion rotieren. Die oben beschriebenen logarithmischen Spiralen entstehen, wenn der Pixelwert radialer Strahlen in Bild 8.1 nach außen hin nicht konstant bleibt sondern logarithmisch abfällt. Pixel mit gleichem Wert beschreiben dann einen Arm der logarithmischen Spirale.

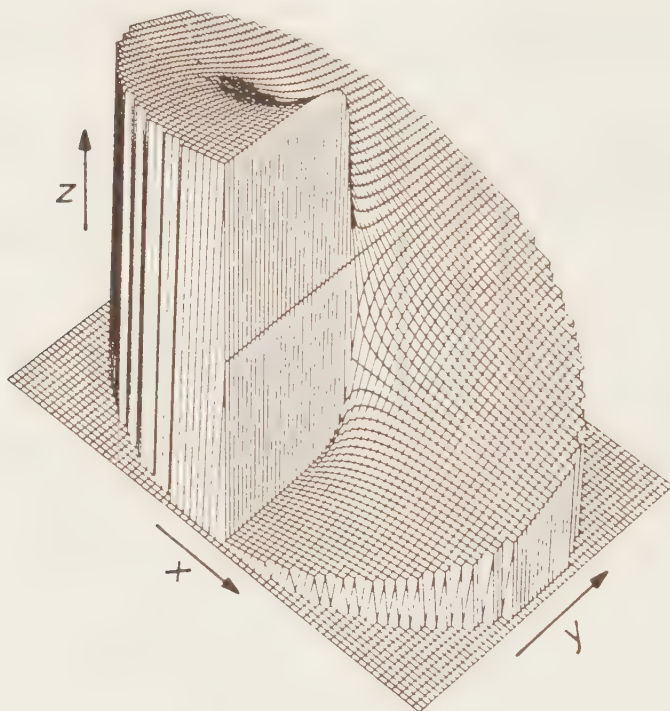


Bild 8.1: Winkelabhängige Funktion $z=\arctan(y/x)$ für 64×64 Punkte zur Darstellung von rotierenden Figuren auf dem FMG.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. R. Röhler für die Überlassung der interessanten Themenstellung sowie für seine zahlreichen Anregungen und Ratschläge bei der Durchführung der Arbeit.

Weiter möchte ich mich recht herzlich bei Herrn Dr. Lang, Herrn Dr. Hundt und Herrn Tengler der Siemens AG, München, für ihr unablässiges Interesse an psychophysikalischen Erkenntnissen bedanken. Die zahlreichen Diskussionsrunden trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr. H.-G. Groth danke ich für die Übernahme des Koreferats.

Herrn Prof. Dr. W. Waidelich, Vorstand des Instituts für med. Optik, danke ich für die Möglichkeit, die Arbeit an seinem Institut durchzuführen.

Besonderen Dank schulde ich auch den techn. Assistentinnen des Instituts, Frau E. Schäffer und Frau C. Steinhoff, die bei der Anfertigung der vielen Zeichnungen sowie als ausdauernde, zuverlässige Versuchspersonen eine unersetzliche Hilfe gewesen sind.

Allen Mitarbeitern des Instituts danke ich für ihr stets förderliches Interesse sowie für die zahlreichen, anregenden Diskussionen. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Phys. W. Schill, Herrn Cand.-Phys. O. Sajuk und Herrn Cand.-Phys. H. Derlich, die sich an vielen Hard- und Softwareproblemlösungen mit Rat und Tat beteiligten und als Versuchspersonen zur Verfügung stellten. Herrn Dipl.-Phys. M. Jüttner danke ich für das geduldige Korrekturlesen des Manuskripts.

Die Arbeit wurde von der Siemens AG, Berlin-München, Abteilung ZT 12, mit einem Doktorandenstipendium gefördert.

LEBENS LAUF

NAME: Gerber VORNAME: Klaus
GEBOREN AM: 19.12.1955 IN: Würzburg
VATER: Rudolf Gerber, selbständiger Kaufmann
MUTTER: Wilhelmine Gerber, geb. Radler, Kauffrau

Schulischer Werdegang:

Von September 1963 bis Juli 1967 besuchte ich die Volksschule in Oberstdorf. Anschließend wechselte ich auf den naturwissenschaftlichen Zweig des Gymnasiums in Oberstdorf und legte dort im Juni 1975 das Abitur ab.

Im November 1975 begann ich mit dem Physikstudium an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Im August 1977 legte ich das Physikvordiplom ab. Von Februar bis August 1980 arbeitete ich als Werkstudent am Institut für medizinische Optik, Abteilung für Datenverarbeitung, der Ludwig-Maximilians-Universität München, an Aufbau und Durchführung von psychophysikalischen Experimenten mit. In meiner Diplomarbeit von Januar 1981 bis Oktober 1982 beschäftigte ich mich mit dem Aufbau eines elektronischen Bildgenerators für psychophysikalische Experimente. Thema der Arbeit: "Entwicklung und Bau eines computergesteuerten Bildgenerators für psychophysikalische Untersuchungen zur Farbmustererkennung am visuellen System des Menschen". Betreuer: Prof. Dr. R. Röhler. Die Diplomprüfung legte ich im Januar 1983 mit Biokybernetik als angewandte Physik und Astronomie als Nebenfach ab.

Ab Mai 1983 erhielt ich ein Doktorandenstipendium der Firma Siemens und arbeitete unter Betreuung von Prof. Dr. R. Röhler an der vorliegenden Arbeit.

